



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

**Ingeniería Mecánica y Eficiencia Energética**

**Tesis doctoral**

***UTILIZACIÓN DE RESIDUOS SIDERÚRGICOS  
PARA DISEÑO Y DOSIFICACIÓN DE  
DIFERENTES TIPOS DE MATERIAL  
CEMENTANTE EN ESTRUCTURAS  
SOSTENIBLES***

**Autora**

Francisca Pérez García

**Directores**

Dra. María Dolores Rubio Cintas

Dr. José Manuel García Manrique Ocaña

**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA




Málaga, 2019



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

AUTOR: Francisca Pérez García

 <http://orcid.org/0000-0002-7195-5686>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): [riuma.uma.es](http://riuma.uma.es)





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

***TESIS DOCTORAL***

***UTILIZACIÓN DE RESIDUOS  
SIDERÚRGICOS PARA DISEÑO Y  
DOSIFICACIÓN DE DIFERENTES TIPOS  
DE MATERIAL CEMENTANTE EN  
ESTRUCTURAS SOSTENIBLES***

***DOCTORANDO***

*Francisca Pérez García*

***DIRECTORES DE TESIS***

*Dra. María Dolores Rubio Cintas*

*Dr. José Manuel García-Manrique Ocaña*

Mayo 2019

**UNIVERSIDAD DE MÁLAGA**  
**Ingeniería Mecánica y Eficiencia Energética**

**Tesis doctoral**

***UTILIZACIÓN DE RESIDUOS SIDERÚRGICOS  
PARA DISEÑO Y DOSIFICACIÓN DE  
DIFERENTES TIPOS DE MATERIAL  
CEMENTANTE EN ESTRUCTURAS  
SOSTENIBLES***

**Autor**

Francisca Pérez García

**Directores**

Dra. María Dolores Rubio Cintas

Dr. José Manuel García Manrique Ocaña

Tesis doctoral presentada en la  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**  
para la obtención del Grado de Doctor

Málaga, mayo de 2019





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

**D<sup>a</sup> María Dolores Rubio Cintas**, Profesora Titular de Universidad, de la Universidad de Cádiz, y **D. José Manuel García Manrique Ocaña**, Profesor Ayudante de la Universidad de Málaga, como Directores de la Tesis Doctoral

**“UTILIZACIÓN DE RESIDUOS SIDERÚRGICOS PARA DISEÑO Y DOSIFICACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE MATERIAL CEMENTANTE EN ESTRUCTURAS SOSTENIBLES”**

presentada por **D<sup>a</sup> Francisca Pérez García**

en la ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES de la UNIVERSIDAD DE MÁLAGA para la obtención del Grado de Doctor.

Hacen constar que dicha tesis cumple las condiciones necesarias para su defensa ante el tribunal que designe la Comisión de Doctorado de la Universidad de Málaga

En Málaga, a 2 mayo de 2019

Fdo.: María Dolores Rubio Cintas      Fdo.: J. M. García Manrique Ocaña



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

A mi marido y mis hijos Patricia y Javier.

A mis padres y hermanos.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## ***AGRADECIMIENTOS***

Esta tesis doctoral no hubiese sido posible sin la colaboración de muchas personas que me han brindado su ayuda, sus conocimientos y su apoyo. Quiero ante todo mostrar mi más sincero agradecimiento por cuanto han hecho por mí para que este trabajo pudiese ver la luz.

Quedo especialmente agradecida a mis Directores de tesis, compañeros, y sobre todo amigos, D<sup>a</sup>. María Dolores Rubio Cintas y D. Jose Manuel García Manrique Ocaña, por su confianza, dedicación y apoyo durante estos años. Gracias por su perseverancia y generosidad, sin ellas, esta tesis no sería una realidad.

A María Eugenia Parrón Rubio, amiga, por su compañerismo y cercanía, por sus importantes aportaciones a este trabajo, por acompañarme en el camino, animando y escuchando, tanto en la ventura como en la desventura, y que indudablemente, debe sentirse copartípe del mismo.

A Antonio González y Miguel Angel Parrón, que de muy diversas formas han contribuido con su ejemplo, su consejo y su ánimo a la realización de este trabajo.

A María José y Manolo, técnicos de laboratorio de la Politécnica de Algeciras, que han estado siempre ahí para prestarme su ayuda y palabras de ánimo.

A Miguel Oliveira, mi tutor en el Algarve. Gracias a la oportunidad que me ha dado estando allí, por todas las facilidades recibidas y su ayuda durante esta etapa de mi investigación.

A Javier López Berenguer, por su inestimable ayuda y paciencia para llegar a este desenlace.

A mi marido, por aguantarme durante días, “dándole la lata” durante estos años de investigación, aguantando mis malos y buenos días, y escuchándome y dándome ánimo cuando más lo necesitaba.

A mis hijos, Patricia y Fco. Javier, que me alegran el día y se me olvidan los problemas que pueda tener los días que no venía con todo el ánimo que debiera.

A Domingo y María José, mis padres, María Jesús, Inmaculada, Alonso y Raúl, mis hermanos y a todas las personas tanto familia como amigos que siempre han tenido una palabra de apoyo y ánimo en algún momento de esta singladura.

## RESUMEN

La principal labor de cualquier ingeniero es la de satisfacer las necesidades de la sociedad de una manera eficiente. Las construcciones proyectadas y ejecutadas deben de cumplir los requisitos que la sociedad demanda, no sólo desde el punto de vista económico, sino también medioambiental y de la seguridad. El sector de la construcción es un sector muy conservador que se basa en la utilización de métodos y técnicas de construcción sustentados en años y años de experiencia. La creciente inquietud en la sociedad acerca del cambio climático y el respeto del medio ambiente hace que se pretenda replantear dichos métodos de construcción tradicionales, cuestionándose si con los medios actuales podrían mejorarse. Por lo que, uno de los desafíos más importantes que enfrentamos como sociedad es lograr un equilibrio entre el consumo de materias primas y nuestra necesidad de desarrollo. La evolución futura de la actividad industrial debe incluir criterios tanto de eficiencia como de reutilización de residuos. Debemos limitar la dimensión de la transformación en un entorno sostenible donde podamos satisfacer nuestras necesidades sin comprometer gravemente las de las generaciones futuras. Para lograr este entorno sostenible, debemos influir fundamentalmente en la reducción de las emisiones de gases nocivos (efecto invernadero) y en la reducción del uso de materias primas naturales.

Una forma de reducir el uso de materias primas es dirigir nuestros esfuerzos hacia objetivos como los propuestos en la teoría de la economía circular. Toma conciencia de que habitamos un mundo con recursos finitos.

Por lo tanto, la esencia de la economía circular es optimizar la reutilización de los recursos generados e introducirlos de nuevo en la cadena de producción. Este proceso, conocido como valorización de residuos, se ha vuelto cada vez más importante y hoy es un campo o investigación con un gran potencial. Así pues, esta tesis ha surgido de una idea de llevar a la



práctica este tipo de economía circular e intentar minimizar lo máximo posible el impacto ambiental que se genera en la obra civil.

Nuestros esfuerzos se centran en la industria de la construcción. En particular, en el proceso de fabricación de materiales a base de cemento. Es un elemento fundamental debido a su papel como componente de unión en diferentes mezclas. Para alcanzar un entorno sostenible, la producción de cemento tendrá que disminuir, por un lado, para minimizar la extracción de piedra caliza y, por otro lado, debido a las regulaciones sobre las emisiones de gases de efecto invernadero. Se estima que la liberación estimada de CO<sub>2</sub> durante la fabricación de clinker es de aproximadamente 0,7 a 0,95 toneladas por tonelada de cemento Portland, lo que significa que la industria del cemento genera entre el 7 y el 9% del CO<sub>2</sub> en todo el mundo. La disminución de estas emisiones es el desencadenante del notable interés de investigación en avanzar en la reducción de la dependencia de la industria del cemento.

En consecuencia, el objetivo principal de esta tesis es sustituir la mayor cantidad de cemento por algún residuo el cual aporte los mismos beneficios al material cementante.

Como alternativa al uso del cemento, se propone su reemplazo parcial por otros materiales. En este punto, la idea de valorización de los residuos existentes en la propia industria se vuelve importante.

La escoria de acero es un subproducto de la fabricación de acero que se obtiene por las reacciones químicas que tienen lugar en los procesos de formación de metales. Es una solución compleja de silicatos y óxidos producidos durante la separación del acero fundido de las impurezas. Las propiedades de la escoria producida por la industria del acero dependen en gran medida del proceso de fabricación.

Existen principalmente cuatro tipos de escoria de acero: “Escoria de horno de arco eléctrico (EAF), Escoria de alto horno (BFS), Escoria de horno de oxígeno básico (BOFS) y Escoria de horno de cuchara (LFS)”.

Entre los tipos de escorias, las de horno de arco eléctrico (Electric Arc Furnace) son más adecuados para fines de ingeniería. Las escorias EAF también se pueden dividir en dos tipos: oxidante o negro y reductor o blanco. En un proceso habitual de fabricación de acero, la escoria negra producida por EAF es del orden de 120 kg por tonelada métrica, y la de EAF blanca es de aproximadamente 25 kg por tonelada métrica.

El aumento en el consumo de acero supone un aumento proporcional en la generación de residuos de esta escoria. Las estrategias de valorización de residuos de las escorias son diversas, pero no suficientes para lograr en la práctica una reutilización real de éstas. Ya sea por problemas regulatorios o económicos. Las escorias de acero se utilizan de muchas maneras, desde fertilizantes hasta la industria civil. En la Unión Europea, se ha utilizado como aditivo para obtener cementos CEM II y CEM III. Las propiedades de la escoria las hacen muy apropiadas para ambientes agresivos. Las escorias mejoran su resistencia a las agresiones producidas por el agua salada o los sulfatos (instalaciones marítimas). En las últimas décadas, los esfuerzos de investigación se han centrado en su uso como aditivos o como sustitutos agregados con áridos, tanto finos como gruesos, o como sustituto de áridos como aglomerantes bituminosos en la capa de pavimento.

Esta tesis, busca analizar la viabilidad técnica de reemplazar el cemento con escoria de la industria del acero. Tanto para la producción de hormigón como de lechada cementosa. Sin embargo, hay muchos factores involucrados, como las propiedades del producto resultante, no solo mecánicas sino de durabilidad, en correlación con las características de la escoria utilizada y su proporción.

La investigación en la sustitución de este material se centra en las escorias siderúrgicas de distintas factorías de España. Se analiza su composición química viendo su comportamiento como conglomerante en la lechada. Es decir, se estudian las características físicas, mecánicas que se obtienen una vez se han sustituido estas escorias en distintos porcentajes por cemento.

Este material ha sido elegido ya que diversas investigaciones nos llevan a pensar que sus propiedades químicas son muy similares a las del cemento, y además se genera una gran cantidad de las mismas en la industria siderúrgica, lo cual también acarrea un problema medio ambiental a las mismas, a la hora de llevarlas a vertedero.

Por ello, profundizaremos en las propiedades tanto físicas como mecánicas para la caracterización de la nueva lechada con escorias siderúrgicas.

Para analizar lo expuesto anteriormente, se han establecido distintos capítulos:

En primer lugar, un capítulo de antecedentes o estado del arte. En él se muestra todo lo estudiado hasta ahora en relación a las escorias siderúrgicas en la construcción viéndose muchas investigaciones en las cuales estos materiales se les han dado un uso en distintos campos de la ingeniería civil. Además, en este capítulo se encuentran los objetivos principales de la tesis y las hipótesis de las cuales partimos, además de su estructuración.

El capítulo dos, “Cemento, Escoria y Lechada de cemento”, muestra los conceptos principales que abarca la tesis. En primer lugar, se desarrolla y define de dónde proviene el material sustituido, el cemento, profundizando en él, desde que se comienza a utilizar, a la diversidad que se fabrica y los materiales que lo conforman. También, la cantidad de escorias de distintas naturalezas que se producen así como sus distintas propiedades, tanto físicas como químicas, las cuales se analizan y comparan, centrándose en las dos que competen a esta tesis, que son las escorias de alto horno (GGBFS) y las escorias blancas de hornos de arco eléctrico (LFS), teniendo de esta última dos tipos de distintas factorías de España.

En último lugar, el capítulo se centra en las lechadas de cemento y la historia de las mismas, desde sus comienzos hasta el día de hoy, sus aplicaciones dentro de la construcción en función de la relación agua/cemento empleada para su fabricación. En consecuencia, como se ve en este capítulo cemento, escorias y lechadas de cemento están íntimamente relacionados en la obra civil, por esta razón, es un claro ejemplo de lo que se pretende conseguir, una economía circular completa

de cómo desarrollar aceros para construcción y ese deshecho que se produce al generarlo, reutilizarlo valorizándolo en la misma construcción, pero en la masa cementante que lo envuelve.

Una vez argumentado estos términos pasamos al capítulo 3 “Materiales, Dosificación y Fabricación de la lechada”, comenzamos con el desarrollo de los materiales que se utilizan para la elaboración de la lechada, para ello, se separa uno a uno todos ellos además de los distintos tipos de escoria que se emplean para la sustitución del cemento. En este estudio se observa como cada una de las escorias tienen composiciones físicas y químicas distintas. En este caso para hacerlas granulométricamente iguales al cemento, con dos de ellas (escorias blancas de horno eléctrico (LFS)) que no tienen la misma granulometría, se tamizan hasta lograr obtenerla, la otra, que son escorias de alto horno (GGBFS) la empresa suministradora las proporciona con dicha granulometría mediante un tratamiento físico con molinos verticales de rodillos. En este capítulo se ve a su vez como son cada una de ellas en su composición química, y la diferencia sobre todo en el dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) que existe entre ambas, ya que las escorias de alto horno tienen un contenido de este compuesto del 32%, mientras que las de arco eléctrico, una contiene un 18%, y la otra incluso menos, un 13%. Este compuesto, junto con la composición química del cemento, es esencial para llegar a la conclusión de porqué las escorias de alto horno tienen un mejor comportamiento mecánico a la hora de utilizarlo como material cementante que las escorias de arco eléctrico, ya que este compuesto tiene la capacidad de generar tobermorita (hidrosilicatos de calcio), que es el causante de otorgarle a la lechada una mayor resistencia, en los siguientes capítulos se observa como se cumple, con las escorias que contienen mayor cantidad de este compuesto.

El cemento utilizado para la elaboración de los diferentes tipos de mezclas ha sido el Cemento Portland CEM I 42,5 y el CEM I 52,5 R cementos sin ningún tipo de adición, para que no tenga ninguna repercusión en los resultados.

Una vez estudiadas las características de cada uno de los componentes de la lechada, la siguiente parte del capítulo es la dosificación con la que se trabaja durante la investigación. Se han utilizado dos dosificaciones, una dosificación con relación agua/cemento 1/1 y otra, con relación 0,67/1. Estas dosificaciones han sido elegidas ya que esta tesis surge, de un proyecto de colaboración con las empresas Drace Infraestructuras S.A. y Geotecnia y Cimientos S.A. concedido por el organismo público CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), en el cual su fin principal es la inyección para grandes volúmenes como sería jet-grouting e inyecciones en presas, luego aquí lo primordial a tener en cuenta es la relación agua/cemento que se utiliza, ya que las lechadas que se fabriquen deben ser fácilmente bombeables, En la primera parte de la investigación se han utilizado los tres tipos de escorias mencionados anteriormente, con una única relación agua/cemento, 1/1, sustitución de escoria por cemento hasta el 50% y cemento CEM I 42,5. Una vez obtenidos los resultados y sabiendo que la escoria que mejor funciona es la GGBFS se amplía la investigación a una segunda fase, dónde se amplían las variables, eligiéndose en este caso dos relaciones agua/cemento, relación 1/1, continuación de lo realizado en la primera parte y con el mismo cemento utilizado, el CEM I 42,5, con aumento de sustituciones de escoria en este caso, 50, 70 y 90%. Y además aquí se introdujeron nuevas mezclas, utilizando la misma relación agua/cemento (1/1) y cemento CEM I 52,5 R y el mismo porcentaje de sustitución, 50, 70 y 90%. Y a su vez, mezclas con relación agua/cemento 0,67/1, con cemento CEM I 42,5 y 50, 70 y 90% de sustitución de escorias y con cemento CEM I 52,5R y 50, 70 y 90% de sustitución.

En conclusión, ver los materiales necesarios así como las sustituciones que se van a fabricar en cada una de las amasadas de escorias por cemento además de hacer un desarrollo del proceso de elaboración que se ha tenido en cuenta para la fabricación del mismo. Por último, se muestra todo el material de laboratorio que se va a utilizar para la elaboración de las probetas (moldes, amasadora, etc...).

Los siguientes capítulos ya muestran directamente los ensayos (se desarrolla el método utilizado para los mismos), resultados a los que han sido sometidos los distintos tipos de mezclas elaboradas, la discusión de los mismos y las conclusiones a las que se han llegado en cada uno.

En el capítulo 4 “Fabricación y comprobación de lechadas con escorias GGBFS y LFS” se desarrollan los ensayos realizados en esta primera fase, se caracterizaron las lechadas fabricadas con distintos porcentajes de sustitución (30, 40, 50%) de diferentes tipos de escorias (GGBFS, LFS1, LFS2).

La comparativa entre las lechadas fabricadas con escorias, y las lechadas fabricadas con cemento Portland, tomadas como referencia de comportamiento, se centrará en su trabajabilidad y en su capacidad resistente, ya que el objetivo principal de estas pruebas es identificar los efectos de la sustitución de escoria de cemento en la respuesta mecánica y en la trabajabilidad de la mezcla, parámetros fundamentales a tener en cuenta, a priori, para determinar la viabilidad de la lechada con esta relación agua/cemento, en este caso relación 1/1.

El capítulo comienza definiendo la codificación que se va a utilizar para las distintas mezclas, a partir de aquí, se explican los ensayos y resultados que se obtienen de los mismos.

“Ensayo granulométrico”, se define el modo de elaboración del ensayo granulométrico, que se realiza haciendo pasar la mezcla por un tamiz de 150 mm de diámetro con una abertura de malla  $\leq 2$  mm, donde se consigna para todas las amasadas de lechadas, tanto de cemento Portland como con sustituciones de escoria la ausencia de grumos sobre el tamiz.

“Ensayo de Fluidéz”, este ensayo es importante para saber la trabajabilidad de la lechada para garantizar una inyección y bombeo eficientes. El ensayo se realiza mediante el cono de Marsh, la fluidez necesaria para los distintos tipo de mezcla debe ser alta, que como se ha comentado anteriormente es la que se requiere para el proyecto por el cual se ha desarrollado esta tesis, una vez han sido elaboradas todas las mezclas se les realizó el ensayo dando un cono entre 8,5 y 9 s. La principal apreciación es que el uso de estos tipos de escorias como sustituto del cemento en la lechada cementosa

no tiene un efecto significativo en la fluidez de la mezcla resultante, al menos en porcentajes de sustitución de hasta el 50%. Esta es una conclusión importante porque asume que estas nuevas mezclas no presentarán desventajas en su aplicación con respecto a las originales, al poder aprovechar las mismas tecnologías de implementación.

“Ensayo de Exudación”, es un tipo de segregación en donde una capa de agua se acumula en la superficie de la lechada durante las primeras horas de hidratación del cemento. El sangrado excesivo puede debilitar la lechada al aumentar la porosidad, lo que afecta a la durabilidad. La prueba mide principalmente la variación de volumen causada por la sedimentación o expansión. Se ha utilizado un tubo transparente de, 65 mm de diámetro interno y de 1 m de longitud. La altura del agua libre se registra después de la sedimentación completa. Esta altura se expresa como un porcentaje de la altura original de la lechada, denominada "porcentaje de sangrado final". En nuestro caso, una vez sometidas todas las mezclas a este ensayo, se observa como la mezcla sin sustitución de escoria exuda considerablemente más que las mezclas con sustitución, también que el porcentaje de agua exudada va disminuyendo en función que va aumentando el porcentaje de sustitución de escoria.

El principal objetivo de esta investigación es, evaluar y analizar el comportamiento mecánico de la lechada, cuando se le incorporan distintos porcentajes y distintas escorias para su fabricación, en lo que se refiere a su comportamiento a la resistencia a compresión principalmente. Así mismo, también se han realizado ensayos para determinar la resistencia a la flexión, ya que, al ser un material nuevo, podemos en función de los resultados buscar nuevas aplicaciones para él. Utilizarlas para casos no estructurales, como puede ser, decoración y/o albañilería.

Con objeto de evaluar la influencia de la dosificación y tipo de cemento empleado en las propiedades mecánicas, se determinaron las resistencias a compresión y a flexión de las lechadas de cemento estudiadas.

“Ensayo de resistencia a flexión”, para el cálculo de la resistencia a flexión se han utilizado probetas prismáticas de 4 x 4 x 16 cm, así como una máquina de ensayo controlada por ordenador mediante un sistema ETIWIN. Esta resistencia se ha calculado mediante la aplicación uniforme

de la carga centrada.

Una vez realizados estos ensayos, se ve que las mezclas con sustitución de escorias no logran superar a la mezcla sin sustitución de escoria a los siete días, sin embargo, a los 28 días de prueba, la diferencia se reduce entre S0 y dos de los tipos de escoria (GGBFS y LFS1). Uno de los efectos observados con la escoria es que el proceso de endurecimiento de la mezcla se modifica y retrasa. La mezcla GGBFS40 muestra el mejor desempeño de todos en esta prueba. Las escorias GGBFS son las únicas que presentan un aumento en la resistencia a la flexión a los 90 días por cada fracción de sustitución (GGBFS30, GGBFS40 y GGBFS50). Por otro lado, la escoria LFS2 muestra malos resultados para esta prueba, la pérdida de resistencia a la flexión para este tipo de escoria aparece a los 7, 28 y 90 días, siendo la pérdida mayor a medida que aumenta el porcentaje de sustitución.

“Ensayo de la resistencia a compresión”, se utilizaron los mismos que en la prueba de flexión ya que cada probeta quedó dividida en dos partes. De este estudio se obtendría una relación media, ya que sólo se realizó el ensayo mediante 2 cubos por cada una de las probetas ensayadas para flexotracción. La resistencia a la compresión de la escoria GGBFS crece a medida que aumenta el porcentaje de sustitución. El mejor rendimiento de compresión se puede atribuir a la mezcla del 50%, que obtuvo una ganancia de fuerza a los 28 y 90 días del 28.35% y 35%, respectivamente. El comportamiento de la escoria LFS1 a los siete días es similar para cada porcentaje de sustitución y de aproximadamente un 30% menos que la mezcla de lechada de referencia a la misma edad. La mezcla LFS1 obtuvo una pérdida de resistencia a los 28 días para cada porcentaje de sustitución, siendo la mezcla del 40% (LFS140) la que mejor comportamiento tuvo, seguida de la mezcla del 30% y la mezcla del 50%. Sin embargo, los resultados a los 90 días muestran una relación entre el porcentaje de sustitución y la resistencia a la compresión, siendo este último mayor a medida que disminuye el porcentaje de sustitución.

La pérdida de resistencia a la compresión obtenida por las mezclas de LFS2, en cada etapa y sustitución porcentual, es significativa. Además, la pérdida es mayor a medida que aumenta el porcentaje de sustitución.



En este estudio las escorias de alto horno (GGBFS) tienen a compresión y a flexión cualidades parecidas e incluso mejores que la lechada de cemento, mientras que las escorias de arco eléctrico (LFS) tienen peores propiedades a compresión, ya que en cualquiera de sus porcentajes de sustitución pierden resistencia.

Por último, se establece una conclusión general, en las que se deja claro que las escorias que tienen mejores características mecánico-resistentes son las escorias de alto horno ya que, no sólo igualan las resistencias de las lechadas de cemento, sino que las mejora.

Para las otras dos escorias se le puede buscar otra solución no estructural, para no tener que ser depositadas en vertedero.

En el capítulo 5 “Fabricación y comprobación de lechadas con escorias GGBFS”, una vez visto que las escorias que mejor funcionan son las GGBFS, la investigación se centra en la utilización de éstas únicamente. Para ello se ha diseñado una campaña de fabricación de 36 amasadas, obteniendo 9 probetas prismáticas por amasada. A cada una de ellas se le han realizado los ensayos en estado fresco. Para los ensayos mecánicos se han ejecutado roturas a 2, 4, 7, 14, 28 y 90 días, para poder determinar las curvas de endurecimiento en los primeros 28 días. Se han utilizado como variables, cementos CEM I 42,5 y 52,5 R, relaciones agua/cemento 1/1 y 0,67/1 y porcentajes de sustitución de escoria del 50, 70 y 90%.

El capítulo comienza definiendo la codificación que se va a utilizar para las distintas mezclas y a partir de ahí se explican los ensayos y resultados que se obtienen de los mismos.

Primero se realiza el ensayo de densidad del material, a cada una de las amasadas realizadas.

Se mide el peso y el volumen con equipos calibrados. Se observa, como la densidad de todas las mezclas de lechada con escorias en sus distintos porcentajes disminuyen con respecto a la mezcla sin escorias.

También se advierte que en las mezclas fabricadas con cemento Portland 42,5 son menos densas que las fabricadas con cemento Portland 52,5. Al igual, que como era de esperar, en las mezclas con relación agua cemento más baja, aumenta la densidad.

El siguiente sería el ensayo de fluidez, que nos indicará la docilidad o trabajabilidad de la mezcla. Se evalúa la fluidez mediante el cono de Marsh y el ensayo de escurrimiento de la lechada. Con el cono de Marsh, se observa como la fluidez en las mezclas con distinto tipo de cemento pero misma relación agua cemento, se comportan prácticamente de la misma forma. En función de la sustitución de escoria por cemento, aumenta la fluidez a la vez que se aumenta el porcentaje de sustitución. Por otro lado, hay un descenso más brusco de fluidez en las mezclas C y D. Es de especial interés observar que, en todas las sustituciones de escorias, la fluidez aumenta con respecto a las mezclas fabricadas sin sustitución. Cuanto mayor es la relación agua/cemento mayor fluidez tienen las mezclas y, por otro lado, como la escoria tiene menor densidad que el cemento, cuanto más cemento se sustituye por escoria, mayor es esta también. Mismos resultados se derivan con el ensayo realizado mediante el escurrimiento de la lechada. Se advierte como en las mezclas con relación agua cemento 1/1, mezclas A y B, el escurrimiento aumenta, con respecto a las mezclas realizadas con relación agua/cemento 0,67/1, las mezclas C y D. También conforme se aumenta el porcentaje de sustitución de escoria, aumenta la fluidez motivado por la menor densidad de la escoria con respecto al cemento, siendo el mayor aumento en la mezcla con sustitución del 90 %. Además la mezcla B aumenta ligeramente el escurrimiento con respecto a la A, en cambio el escurrimiento en las mezclas C y D, relación agua cemento 0,67/1, se mantiene prácticamente igual, aunque el escurrimiento de las mezclas D disminuyen ligeramente.

Posteriormente se realiza el ensayo de exudación, igual que en el capítulo 4, para determinar la segregación de la mezcla. De este ensayo se desprende que las mezclas sin sustitución de escorias son las que más exudan, que las mezclas con relación agua/cemento 1/1 lo hacen más que

las mezclas con relación agua/cemento 0,67/1, Todas ellas exudan conforme al aumento de tiempo. Cuanto mayor es el porcentaje de sustitución de escoria menor es la exudación debido a la hidratación de la escoria que tiene mayor superficie específica. A partir de los 180 minutos la exudación se estabiliza en todas las mezclas.

En este capítulo, se realiza el ensayo de expansividad de la escoria, para identificar si esta escoria expande o no. Se ha utilizado el método de la estabilidad de volumen del cemento considerándose este el más adecuado ya que la sustitución que hacemos de la escoria es por cemento.

La estabilidad volumétrica se determina observando la expansión volumétrica de la pasta de cemento/escoria de consistencia normal. Para la obtención de esta consistencia se utiliza el aparato de Vicat. Se obtiene como resultado que la escoria expande menos que el cemento.

El siguiente ensayo es el ambiental, lo que supone medir la lixiviación de las mezclas realizadas, ya que se debe estudiar el efecto que puedan causar las escorias una vez encapsuladas y colocadas en el medio.

Lo primero que nos encontramos son generalidades acerca de lixiviado, los factores tanto físicos como químicos que influyen en las muestras, así como las diversas normativas para realizar los ensayos de lixiviado. Estas normativas también proponen opciones para reducir la solubilidad de las escorias, como estabilización, solidificación, vitrificación y extracción química. En nuestro caso hemos utilizado un proceso de estabilización-solidificación.

Para la realización de este ensayo se ha tomado un trozo de cada probeta rota para que estuviese en las peores condiciones, y también se evalúa el agua de exudación. Se han realizado los análisis de lixiviado en la sustitución de escoria por cemento al 70% y cemento 52,5R y a la mezcla sin sustitución de escoria. Se tuvieron 48 h en un litro de agua destilada, y esta agua se mandó analizar a un laboratorio externo. Los resultados obtenidos, y teniendo en cuenta los valores máximos permitidos por las DG 4291, nos indican que el uso de este tipo de mezclas, una vez fuesen puestas en servicio, no superarían estos valores.

Se observa que en los elementos químicos estudiados, todos en las mezclas con sustitución de escorias disminuyen con respecto a la lechada convencional. En las muestras realizadas en mg/kg, todas están por debajo de los valores admitidos por la norma, sin embargo, en las muestras realizadas en mg/l, todos los valores están por debajo del valor de la norma excepto el Cr que en el caso de la mezcla de sustitución de escoria obtiene 0,853 mg/l y en la lechada de cemento sin sustitución (convencional) se obtiene 1,23 mg/l, estando los dos casos por encima del valor permitido por la norma que es de 0,1 mg/l. Lo interesante es que la mezcla con sustitución de escoria, aun así, está bastante por debajo de la mezcla sin sustitución. Estos valores, intentando que las mezclas exuden mucho menos no tendrán repercusión. Así que, el encapsulamiento lo que hace es que este metal se diluya en la matriz cementosa sin generar peligro ambiental una vez sea colocado en el medio.

A continuación, se realizan los ensayos para la comprobación de las resistencias mecánicas, dónde se desprende como resultados que la respuesta mecánica en cuanto a flexión y compresión desprende mejores resultados en todos los tipos de mezclas realizadas con escorias que la realizada con cemento.

Uno de los efectos observados con la sustitución de escoria es que el proceso de endurecimiento de la mezcla se modifica y retrasa. El principal problema de este tipo de mezclas es que a edades tempranas la convencional adquiere con mayor rapidez la resistencia a la flexión y compresión, pero por el contrario con el paso del tiempo el porcentaje de resistencia aumenta.

Por otro lado, las mezclas fabricadas con cemento CEM I 52,5R alcanzan más resistencias tanto en flexión como en compresión que las fabricadas con cemento CEM I 42,5 R, excepto las mezclas con el 90% de sustitución donde al tener tan alto porcentaje de escorias el comportamiento es prácticamente el mismo con los dos tipos de cemento.

Se observa también que las mezclas realizadas con sustitución de escorias y con relación agua/cemento 1/1 son las que más ganancia de resistencia tanto a flexión como a compresión adquieren con respecto a la mezcla sin

sustitución de escoria, debido a la mayor hidratación de las escorias que componen la mezcla.

También se desprende que las mezclas óptimas son las realizadas con el porcentaje del 70% de sustitución, tanto con los diferentes tipos de cemento y diferentes tipos de relación agua/cemento, tanto a flexión como a compresión.

En el capítulo 6 “Aplicación práctica de la nueva matriz cementante” se muestra la puesta en servicio del nuevo material realizada por la empresa Geocisa en el Puerto de Valencia con las escorias de alto horno. La Empresa decidió realizar una serie de pruebas tanto en el laboratorio como en obra, para revalidar los resultados obtenidos en el laboratorio de la UCA. Se realizaron tres pruebas adicionales, una primera prueba en el laboratorio con CEM III/A 38% de escoria y relación agua/cemento 1/1, una prueba en obra con la misma dosificación y la prueba patrón. También se han realizado pruebas con la escoria de alto horno GGBFS, ya que una vez sometidas a pruebas de laboratorio eran las que mejor han funcionado. Se han probado dos dosificaciones distintas de lechada sustituyendo parte del cemento por escorias en dos porcentajes de sustitución, 70% y 90% con relación agua/cemento de 1/1 y cemento Portland 52,5. Por último, también se decidió fabricar una lechada con el porcentaje de sustitución óptimo (70%), bajando la relación agua/cemento a 0,8/1 y utilizar un aditivo.

Por lo tanto como conclusión de este capítulo, la sustitución de cemento por escorias de alto horno para la fabricación de lechada es un buen modo de contribuir con el medio ambiente.

En el capítulo 7, se obtienen las conclusiones finales y futuras líneas de investigación.

Como conclusión final y después de examinar todos los ensayos realizados, se concluye que la escoria que mejor funciona como sustitución de cemento, es la escoria de alto horno, ya que como se ha comprobado, tienen resultados iguales e incluso mejores que el hormigón convencional. Para las escorias de arco eléctrico, se pueden buscar otros usos en la albañilería.

A raíz de esta investigación hay diversas líneas de investigación, como sería intentar llegar a conseguir incorporar aditivos que minimicen el porcentaje de agua exudada en relaciones agua /cemento altas. También fabricar lechadas con relación agua/cemento entorno a 0,4/1 para aplicarlas en micropilotes y realizarle estudios de durabilidad.

Además de ver el comportamiento de estas escorias en otro tipo de matrices cementantes, como son, morteros, hormigones, hormigón ultra higt.

## ABSTRACT

Satisfying society's needs in an efficient and optimal way is the main task of any engineer.

The designed and executed buildings must fulfill the requirements that society demands, not only from an economic, but also an environmental and safe point of view. Building sector is really conservative, based on the use of construction methods and techniques supported by years of experience. The increasing concern about climate change and respect for environment is making these traditionalist building methods to be raised again and the possibility to be improved. So that, one of the most important challenges of today's society is getting a balance between raw materials consumption and our growth need. Industrial activity's future development must include both efficiency and waste reuse criteria. We must control transformation dimensions into a sustainable environment where we can satisfy our desires without endangering the future generations ones. We have to reduce harmful gas emissions (greenhouse effect) and raw materials use in order to achieve this sustainable environment.

Addressing our efforts into objectives like the ones presented in the Circular Economy Theory is a good way of reducing raw materials use. Be aware of living in a world with finite resources.

Therefore, circular economy's essence is the optimization of generating resources reuse and putting them back into the production chain. This process is known as waste valorization and it is so important nowadays that is being investigated with such potential. So that this thesis has been done to put this circular economy into practice and to minimize civil engineering's environmental impact as maximum as possible.

Our efforts are focused on the construction industry, especially in the cement-based materials manufacturing process. It is a fundamental part due to its role as a binding component in different mixtures. Cement production has to decrease to reach a sustainable environment in order to minimize limestone extraction, according to greenhouse gases emissions

laws. The estimated CO<sub>2</sub> release during clinker manufacture is around 0.7 to 0.9 tons per ton of Portland cement, which means that the cement industry generates between 7 and 9% of CO<sub>2</sub> worldwide. The reduction of this emissions is the triggering point of researching interest in reducing cement industry dependence.

As a consequence, the aim of this thesis is substituting the highest amount of cement by other residue which provides the same benefits to cementing material, that's why it proposes its partial replacement by any other material. The idea of existing wastes valorization in this industry is becoming more important right now.

Steel slag is a derivative of steel manufacturing which is obtained by the chemical reactions that take place in metal formation processes. It is a complex solution of silicates and oxides produced during the melted steel separation from stains. Slag properties produced by steel production depend on manufacturing processed.

There are four types of steel slag: Electric Arc Furnace slag (EAF), Blast Furnace Slag (GGBFS), Basic Oxygen Furnace Slag (BOFS) and Ladle Furnace Slag (LFS).

Between these types of steel slag, the EAF slags are the most suitable for engineering purposes and can be divided into oxidizing or black slags and reducing or white slags. During the manufacturing process of steel, the EAF black slag produced is in the order of 110-130kg per metric ton and the EAF white one is about 20-30kg per metric ton.

Steel consumption increase generates a growth in slag wastes generation. There are many slags valorization strategies, but they are not enough to get a real reuse of them, because of regulatory and economic issues. Steel slags are used in many different ways, as fertilizers, in civil industry or as an additive to obtain cements CEM II and CEM III in the European Union. Slags properties make them suitable for aggressive environments, as they improve their resistance to salt water or sulphates (maritime facilities). In the last decades, researching efforts have been focused in their use as



additives, as both fine and coarse aggregates substitutes with arid and as substitute of arid as bituminous binder in pavement layer.

This thesis chases analyzing technical viability of replacing cement with steel slag both for green concrete production and green cementitious grout production. Nevertheless, there many involved factors such as the resulting product properties, not only mechanical but also from durability, related to the characteristics of used slag and its proportion.

The investigations of this material substitution is focused on iron and steel slags from different Spanish factories. Their chemical composition is analyzed, considering its use as a conglomerate in grout, so that, their physical and mechanical properties are studied once these slags have been substituted between different percentages per cement.

This material has been chosen because many investigations make us think that their chemical properties are really similar to the cement ones, and also because many of them are produced in metallurgy, which also creates an environmental problem when they have to be taken to a landfill. That's why we go in depth in both new grout physical and mechanical properties with iron and steel slags.

Different chapters have been set in order to analyze what has previously been discussed:

First of all, there is a precedents or art status chapter, which shows everything related to metallurgic slags in building that has been already studied, having a look at researches in which these materials have been used in other fields rather than civil engineer. Moreover, this chapter includes the objectives and hypothesis that this thesis is based on, and also its structure.

The second chapter, called *Cement, slag and cement grout*, shows main concepts of this thesis. Firstly, it shows where does the cement come from, delving into when it is started to use, its diversity and materials which it is

composed. And also it comments the amount of different origin slags and its properties, both physical and chemical, which are analyzed and compared, focusing on the two ones which are studied in this thesis, Blast Furnace Slag (GGBFS) and Ladle Furnace Slag (LFS), taking two different Spanish factories from this last one.

Lastly, the chapter focuses on cement grout and its origin, since its beginning till today, its uses in building related to the used of water/cement for its production. As a consequence, cement, slags and cement grout are extremely connected in civil work so that's why they are a great example of what we want to achieve, which is a full circular economy about how developing steels for construction and reusing their wastes by valorizing them in the same construction, but into the cementitious mass which evolves them.

Once we have argued this topic, we move on to Chapter 3 *Materials, dosage and grout production*. We start with the materials development which are used in grout making and for that, each of them are separated from the other, apart from the different types of slags used for cement substitution. This study analyze how every slag has different physical and chemical compositions. In order to make slags granulometrically similar to cement, two LFS slags are sieved to get a new one, the GGBFS slag. Supply company provides the exact granulometry by a physical treatment with vertical rolling mills. This chapter also studies their physical composition and their different between them related to silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ ), because the GGBFS have 32% of it and the LFS just 18%.. This compound and the chemical composition of the cement are essential to understand why GGBFS have better mechanical behaviour than LFS when they are going to be used as cementitious material, and it is because GGBFS have the capacity to produce tobermorite (calcium hydrosilicates), which is the one responsible for giving more resistance to the grout. The following chapters will contemplate how it is fulfilled with the slags that have more density of this compound.

The cement which is used for making different types of mixtures is Portland Cement CEM I 42,5 and CEM I 52,5R, which are cement with no additions in order not to affect the results.

After studying the characteristics of every component of the grout, the next part of the chapter is the dosage which is used during the investigation. Two dosages have been used, one with a relation water/cement 1/1 and another with a relation 0,67/1 of them. This dosages has been chosen because this thesis comes from a collaborative project between Drace Infraestructuras S.A. and Geotecnia y Cimientos S.A. awarded by the public organization CDTI (Centre for the Development of Industrial Technology), whose main aim is the injection in big volumes like jet-grouting and dam injection, so that's why it is so important to consider the water/cement relation used in order to get easily pumpable grouts. The three, previously mentioned, types of slags have been used with the same water/cement relation 1/1, slag substitution by cement till 50% and cement CEM I 42,5 on the first part of the investigation. Once we got the results and taking into account that GGBFS slags are the best one to work with, the investigation goes to a second phase, where variables are increased and two water/cement relations are chosen. It is done after the first phase but with the same used cement, which is CEM I 42,5, with slag increases of 50%, 70% and 90%. New mixtures were included on this phase, using the same water/cement relation (1/1) and cement CEM I 52,5 with the same substitution percentages 50%, 70% and 90%; and also mixtures with water/cement relations 0,67/1 with cement CEM I 42,5 and 50%, 70%, 90% of slag substitutions with cement CEM I 52,5R and 50%, 70% and 90% of substitution were used.

On balance, what we do is considering the needed materials, the substitutions which are going to be used in every slag kneading with cement, making a development of the fabrication process taking into account what has been used for that. Finally, all the laboratory material which is going to be used to elaborate the test tubes are shown (molds, kneading machine, etc...)

The next chapters show the trials directly (the method for them is developed), the results to which different types of mixtures have been subjected to, their discussion and the conclusions.

In the fourth chapter Making and grouts checking with GGBFS and LFS slags we develop the trials done in this first phase, where grouts were characterized with different substitution percentages (30%, 40% and 50%) from different type of slags (GGBFS, LFS1, LFS2).

The comparison between slag-made grouts and cement Portland grouts, taken as a behaviour reference, will focus on its workability and its resistance capacity, because the main objective of these tests is to identify the cement slag substitution effect on the mechanical response and workability of the mixture, which are fundamental parameters to take firstly into account, to determine the slag viability with this water/cement relation 1/1.

The chapter starts defining the code which is going to be used for the different mixtures, and after that, trials and results are explained in detail.

**Granulometrical Test:** The granulometrical test elaboration mode is defined, which is made by putting the mixture through a 150mm sieve with a mesh opening  $< 2\text{mm}$ , where on every kneaded grout, both with Portland cement and slags substitutions, the lump absence is consigned.

**Flow cone Test:** This test is important to know grout workability to guarantee efficient injection and pumping. The test is made in the same as Marsh test, where the needed fluency must be high for every type of mixture because, as previously commented, is the one required for the proyect of this thesis. Once every mixture has been made, they were made a test giving a cone between 8,5 and 9s. The main assessment is that the use of this type of slags, as a cement substitute in cementitious grout, doesn't have any significant effect in the resultant mixture fluency, at least in substitution percentages till 50%. This is an essential conclusion because we assume that this new mixtures don't create disadvantages in their application, compared with the original ones, because they can leverage the same implementation technologies.

Exudation test: Segregation type where a water layer is accumulated on the grout surface during the first hours of cement hydration. The excessive bleeding can weaken the grout because it increases porosity, which affects durability. The test mainly analyze the volume variation which is caused by sedimentation or expansion. A 65mm of diameter and 1m of length transparent tube has been used to register free water height after full sedimentation. This height is assumed as the original height percentage of the grout, called *final bleeding percentage*. In our case, after testing every used mixtures, we observe how the mixture with least slag substitution exudes more than the other ones with substitution, and we also see that the exuded water percentage decreases as the slag substitution percentage increases.

The main objective of this research is evaluating and analyzing the mechanical behaviour of the grout, when different percentages and slags are added to its making, mainly for its resistance behaviour to compressive strength. In addition, some tests have been made to determine flexural resistance as it is a new material, we can look for new applications for it depending on the results and also using them with no structural cases as decoration and construction.

In order to assess dosage and type of used cement in the mechanical properties influence, we determined compressive and flexural resistances of the analyzed cement grouts.

We have used prismatic test tubes of 4 x 4 x 16cm and a controlled trial machine by computer with a ETIWIN system on flexion resistance trials. This resistance has been calculated by the uniform application of the well-balanced load.

After making these tests, it is shown that slags substitution mixtures cannot lead the mixture with no slag substitution in seven days, but after 28 days, the difference between S0 and the two type of slags (GGBFS and LFS1) is reduced. One of the contemplated effects with the slag is that the hardening process of the mixture is modified and delayed. The mixture

GGBFS40 shows a the best performance of all in this test. GGBFS slags are the only ones which show a flexural resistance increase after 90 days per every substitution part (GGFBS30, GGBFS40 and GGBFS50). On the other hand, the LFS2 slag shows bad results for this test because the flexion resistance loss for this type of slag appears after 7, 28 and 90 days, being the biggest loss while substitution percentage increases.

On the compressive strength test we used the same slags as in the flexural strength test, as every test tube was divided in two parts. We got an average relation, as the test was just made with two buckets for every used test tube for flexotraction. GGBFS slag's compressive resistance increases when substitution percentage grows. The best compressive performance can be justified by the 50% mixture, because it got a strength profit of 28%, 35% and 35% respectively, after 28 and 90 days.

After seven days, LFS1 slag behaviour is similar to every substitution percentage and 30% less than the grout mixture of reference at the same age, approximately. LFS1 mixture obtained a resistance loss in 28 days for every substitution percentage, being the 40% mixture the one which got the best behaviour, being followed by the 30% mixture and the 50% mixture. However, the results after 90 days show a relation between the substitution percentage and the compressive resistance, being this one bigger when the substitution percentage decreases.

The compressive resistance loss obtained by LFS2 mixture is significant in every period and percentage substitution. Moreover, the loss is bigger when the substitution percentage increases.

In this study, GGBFS slags have same characteristics in flexural and compressive facts, even better than cement grout, while LFS slags have worse compressive properties because they lose resistance in every substitution percentage.

Lastly, a general conclusion is established to make clear that GGBFS slags have better mechanical-resistant properties, because they improve cement grout resistances. We can find a non-structural solution for the other two slags in order not to send them to a landfill.

The fifth chapter Grout making and checking with GGBFS slags focuses on the GGBFS slags utilization, as they are the ones which work better. A making campaign of 36 kneadings has been designed for that, getting 9 prismatic test tubes per kneading. The trials have been made to them in fresh state. Breakings have been made for the mechanical tests after 2, 4, 7, 14, 28 and 90 days in order to clarify the hardening curve in the first 28 days. Cements CEM I 42,5 and 52,5 r, water/cement relations of 1/1 and 0,67/1 and slag substitution percentages of 50%, 70% and 90% have been used.

The chapter starts with the code definition which is going to be used for the different mixtures and, after that, the obtained trials and results are explained.

First of all, the material density test is made to every kneading that have been made, Weight and volume are measured with calibrated equipment. It is observed that every grout density with slags decrease in its different percentages, compared to the other mixture without slags. It is also advised that the mixtures with Portland cement 42,5 are less thick than the ones with Portland cement 52,5. Density increases in the mixtures with a lower water/cement relation, as expected.

The next one would be the flow test, which will indicate the workability of the mixture. Flow is measured with the Marsh cone and the slag runoff test. With the Marsh cone, it can be seen that mixtures flow with different cement type but same water/cement relation practically behave in the same way. Flow increases at the same time as substitution percentage increases, depending on the cement slag substitution. On the other side, there is a higher flow decrease on C and D mixtures. It is very interesting to analyze

that in every slag substitution, flow increases in relation to mixtures with no substitution. Mixtures are more fluent when there is a higher water/cement relation and density also increases when more cement is substituted by slags, as they have less density than cement. We obtained same results with the test made with grout runoff. As it happens in water/cement relation 1/1 mixtures, A and B mixtures, runoff increases in relation to water/cement relation 0,67/1 mixtures, C and D mixtures. If slag substitution percentage increases, flow grows due to the low slag density in relation to cement, with the biggest increase in the 90% substitution mixture. Moreover, mixture B slightly grows the runoff in relation to A, but in C and D mixtures, with water/cement relation 0,67/1, it remains the same, even though it decreases a bit in D mixtures.

As in chapter four , we made the exudation test to clarify the mixture segregation. We get from this test that mixtures without substitution are the ones which more exude and also that water/cement 1/1 relation mixtures exude more than the ones with water/cement relation 0,67/1. Each one of them exude as a matter of time. Exudation is lower when the slag substitution percentage is bigger due to the slag hydration that has more specific surface. Exudation stabilizes in all mixtures after 180 minutes.

The slag expansiveness test is made in this chapter to identify if the slag spreads. Cement volume stability method has been used because it is the more suitable, as we make a substitution of the slag by cement.

Volumetric stability is determined by watching the volumetric expansion of the cement/slag plaster with normal consistency. We use the Vicat device to get this consistency and we get to know that slag spreads as a result.

The next step is the ambient test, which is the one where we measure the mixtures leaching, as we must study the effect that slags can produce once they are capsulized and put in the environment.



We have found some generalities regarding leachate, physical and chemical factors than interfere with the samples and different laws to make leachate tests. This regulations also suggest options to reduce slags solubility as stabilization, solidification, vitrification and chemical extraction. We have made a stabilization-solidification process in our case. We have taken a piece of each broken test tube, so they can be in the worst conditions, and evaluate the exudation water to make this test. Leachate analysis have been made to the cement slag substitution at 70% and cement 52,5R and to the mixture without slag substitution. They were kept in one liter of distilled water for 48h and after that it was analyzed by an external laboratory. Taking into account the maximum allowed values by DG 4291, the results indicate that this mixture use wouldn't surpass this values, once they are put into work.

All of the studied chemical elements decrease in the mixtures with slags substitution in relation to the normal grout. Every sample made in mg/kg are below allowed values by law, while the ones made in mg/l have all values below law except for Cr, which obtains 0,853 mg/l in the slag substitution mixture and 1,23 mg/l in the cement grout without substitution, being both cases above the allowed value by law, which is of 0,1 mg/l. The most interesting thing is that the slag substitution mixture is lower than the mixture without substitution. This values won't impact the fact that the mixtures exude a lot. Encapsulation makes this metal to be diluted in the cementitious mold without any environmental danger, once it is put on the ground.

Next we make tests to check mechanical resistances, , from which we get that mechanical response in relation to compressive and flexural provides better results in every slag-made mixtures rather than in cement-made mixtures. One of the effect of the slag substitution is that the hardening process of the mixture is modified and delayed..The main issue of this type of mixture is that, at the beginning the conventional one gets resistance to compressive and flexural faster, but the resistance percentage increases over time.

Moreover, mixtures made with cement CEM I 52,5R get more resistance to compressive and flexural than the ones made with cement CEM I 42,5 R, except the ones with 90% of substitution, as they a high slag percentage and its behaviour is the same with both types of cement. We also discover that mixtures with slag substitutions and water/cement relation 1/1 are the ones which more resistance to flexural and compressive get in relation to the mixture with no slag substitution, due to the higher hydration of the slags that make the mixtures. It is also revealed that optimal mixtures are the ones with a 70% of substitution, with both type of cements and different types of water/cement relation to flexion and crushing.

In the 6<sup>th</sup> chapter *Practical application of the new cementitious mold* we implement the new material made by Geocisa company in Valencia port with blast furnace slags. The company decided to make some tests in the laboratory and by building in order to confirm the results obtained by UCA's laboratory. Three additional tests were made: the first one was done in the laboratory with CEM III/A with 38% of slag and water/cement relation 1/1, a building test with the same dosage and the pattern test. We have also made tests with GGBFS slags, because they were the best ones once we made tests with them in the laboratory. Two different grout dosages have been tested, replacing some of the cement with slags with two substitution percentages of 70% and 90% with water/cement relation of 1/1 and Portland cement 52,5. Lastly, we decided to make grout with the optimal substitution percentage (70%), reducing the water/cement relation to 0,8/1 and using an additive. As a conclusion, cement substitution with GGBFS slags to make grout is a good way of respect the environment.

In the 7<sup>th</sup> chapter we present the final conclusions and the future researching lines. As a final conclusions and after inspecting every trial that we made, we conclude that the slag which works best as a cement substitution is thee blast furnace slag, as it has been checked, provides same results and even better than the normal concrete.

The electric arc furnace slag can be used for another building applications. There are some researching lines after this investigations, like trying to incorporate additives that reduce exuded water percentage in high water/cement relations and also making grouts with water/cement relations around 0,4/1 to use them in micropiles and make them durability trials. And also watch these slags behaviour in another type of cementitious molds like mortars, concretes, ultra higt concrete, etc.

# ÍNDICE

## CAPÍTULO 1

1.1 Antecedentes .....	7
1.2 Motivación y Objetivos de este trabajo.....	14
1.3 Contenidos de la memoria.....	16
1.4 Bibliografía .....	18

## CAPÍTULO 2

2.1 Cemento Portland.....	29
2.2 Escorias .....	44
2.3 Lechadas de cemento .....	54
2.3.1.2 Jet Grouting:.....	56
2.4 Bibliografía .....	60

## CAPÍTULO 3

3.1 Introducción .....	69
3.2 Caracterización de los materiales.....	70
3.3 Dosificación, amasado y preparación de las probetas.....	79
3.4 Bibliografía .....	84

## CAPÍTULO 4

4.1 Introducción .....	91
4.2 Ensayo granulométrico mediante tamizado .....	92
4.3 Ensayo de Fluidez .....	93
4.4 Ensayo de exudación.....	96
4.5 Determinación de Resistencias Mecánicas. ....	102
4.5.2 Proceso de elaboración de los ensayos mecánicos.....	102
4.6 Resumen de ideas principales .....	123
4.7 Bibliografía .....	124

## CAPÍTULO 5

5.1 Introducción.....	133
5.2 Densidad del material .....	134
5.3 Ensayo de Fluidez.....	135
5.4 Ensayo de exudación .....	140
5.5 Ensayo de expansividad de la escoria.....	147
5.5.1 Introducción.....	147
5.6 Comportamiento ambiental de la lechada con escoria. Lixiviado .....	152
5.7 Ensayo de Flexión .....	159
5.8 Ensayo de compresión .....	171
5.9 Resumen de ideas principales.....	183
5.10 Bibliografía.....	185

## CAPÍTULO 6

6.1 Introducción.....	191
6.2 Pruebas .....	191
6.3 Conclusiones.....	199

## CAPÍTULO 7

7.1 Introducción/ Introduction.....	205
7.2 Conclusiones generales/ General conclusions .....	206
7.2.1 Propiedades de las escorias utilizadas en esta tesis/ Properties of the slags used in the thesis.....	207
7.2.2 Propiedades físicas de las lechadas obtenidas/ Physical properties of the grouts cement obtained.....	209
7.2.3 Propiedades mecánico-resistentes de las lechadas obtenidas/ Mechanical properties of the grouts cements mixtures .....	211
7.2.4 Comportamiento medioambiental de las lechadas con sustitución de escorias/ Enviromental behavior of the grouts with substitution of slags ...	212
7.3 Conclusión Final/ Final conclusion .....	213
7.4 Futuras líneas de investigación/ Futures lines of research.....	214

# **CAPÍTULO 1**

## **Introducción y antecedentes**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## Índice

1.1 Antecedentes .....	7
1.2 Motivación y Objetivos de este trabajo.....	14
1.3 Contenidos de la memoria.....	16
1.4 Bibliografía .....	18

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1: Economía Circular .....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 1.2: Desarrollo Sostenible (Brundtland).....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 1.3: Nuevos aspectos de la Sostenibilidad (Agenda 21) [4].....</i>	<i>9</i>





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## 1.1 Antecedentes

Hasta el siglo XIX se sostenía que la Naturaleza era incontrolable, siendo ésta a la vista de la sociedad como una “canasta de recursos” (animales, vegetales, minerales etc.), dónde los elementos del medio eran catalogados según la utilidad que representaban para el ser humano, anulando aquellos que no tenían utilidad y considerándolos como inservibles, estas ideas perduraron hasta gran parte del siglo XX, a partir de la década de 1960, la imagen de una Naturaleza agresiva, todopoderosa, poco a poco, da paso a una Naturaleza frágil y delicada [1].

El creciente impacto del desarrollo industrial sobre el medio ambiente, jugó un papel importante para el cambio de visión de la Naturaleza, obligándonos a tomar conciencia sobre los impactos del actuar del ser humano sobre el medio ambiente. Se dieron los primeros antecedentes formales de avances en la protección ambiental, el “*Informe sobre los Límites del Crecimiento*” y la “*Declaración de Estocolmo*”, ambos presentados en 1972 [2]. Ya a partir de aquí lo que hasta entonces se conocía como Economía Lineal, no reducir, reusar y reciclar podría estar llegando a su fin, para pasar a aplicar el concepto de Economía Circular, donde todos los elementos cumplen una función de manera continua y son reutilizados para su aprovechamiento en diferentes etapas Figura 1.1.



Figura 1.1: Economía Circular

En Octubre de 1984, se reunió por primera vez la Comisión Mundial sobre

Medio Ambiente y Desarrollo (World Commission on Environment and Development), coordinada por la Dra. Gro Harlem Brundtland, dando lugar al conocido como “*Informe Brundtland*”, presentado a la AGNU en 1987, un nuevo concepto de Desarrollo Sustentable como la posibilidad de lograr un futuro mejor, debemos limitar la dimensión de la transformación en un entorno sostenible donde se satisfagan nuestras necesidades sin comprometer gravemente las de las generaciones futuras, definición general que se sostiene hasta la actualidad [3]. Definición que se refleja en la Figura 1.1.

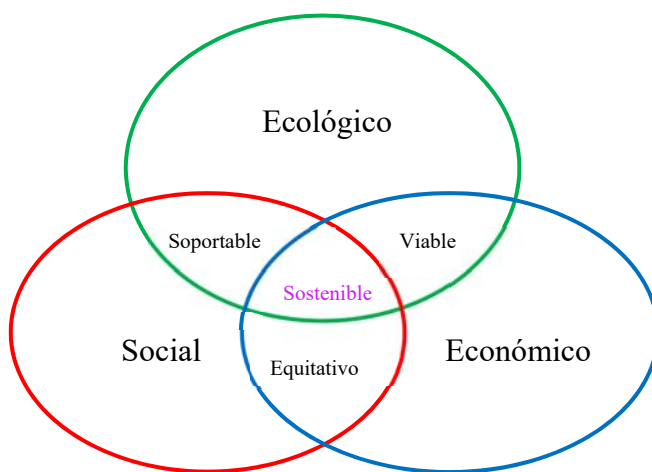


Figura 1.2: Desarrollo Sostenible (Brundtland)

Los hallazgos de este Informe motivaron la convocatoria a la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (Río de Janeiro 1992). Sus resultados fueron la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (*Agenda 21*). La Declaración Final de la Cumbre estableció 27 Principios que definieron los derechos y obligaciones de las sociedades y los Estados en los temas ambientales, que sirvieron de base para el desarrollo de legislaciones y políticas nacionales en la materia.

Las categorías tradicionales de la Sostenibilidad hasta esta Agenda 21, contemplan aspectos sociales, económicos y ambientales, mientras que la nueva propuesta de sustentabilidad, a partir de dicha agenda, involucra

adicionalmente aspectos institucionales, culturales, de gobernanza, tecnología, política y éticos, aspectos que se representan en la Figura 1.2.



Figura 1.3: Nuevos aspectos de la Sostenibilidad (Agenda 21) [4]

Por último en Septiembre 2015, se aprobó la Agenda 2030, que servirá de guía para la política y financiación durante los próximos años, donde se establecen 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible y sus 169 metas [5].

Uno de los desafíos más importantes que enfrentamos como sociedad es lograr un equilibrio entre el consumo de materias primas y la necesidad de desarrollo de la sociedad. La evolución futura de la actividad industrial debe incluir criterios tanto de eficiencia como de reutilización de residuos.

Una forma de reducir el uso de materias primas es dirigir nuestros esfuerzos hacia objetivos como los propuestos en la teoría de la economía circular. Tomar conciencia de que habitamos un mundo con recursos finitos. Para lograr este entorno sostenible, se debe influir fundamentalmente en la reducción de las emisiones de gases nocivos (efecto invernadero) así como en el uso de materias primas naturales.

Por lo tanto, la esencia de la economía circular es optimizar la reutilización de los recursos generados e introducirlos de nuevo en la cadena de producción. Este proceso, conocido como valorización de residuos [6], se ha vuelto cada vez más importante y hoy es un campo de investigación con un gran potencial. La necesidad y preocupación de los ciudadanos, por preservar los recursos naturales y controlar la contaminación ambiental, junto con la cada vez más estricta normativa por parte de la administración, son algunas de las motivaciones hacia lo sostenible. Estos enfoques, han impulsado en el mundo entero la imprescindible necesidad de una toma de conciencia hacia la preocupación por el desarrollo sostenible, investigando y desarrollando técnicas de aprovechamiento (reutilización), así como el reciclado de los subproductos industriales. Sin embargo, en determinadas aplicaciones constructivas, es necesario generar el suficiente conocimiento científico-técnico que posibilite la valorización de residuos y subproductos garantizando el adecuado nivel prestacional (funcional, medioambiental y social) de la aplicación final.

Se entiende por residuos industriales, aquellos residuos resultantes de los procesos de fabricación, de transformación, de utilización, de limpieza o mantenimiento generados por la actividad industrial, excluidas las emisiones a la atmósfera reguladas en la ley 34/2007, de 15 de noviembre, [7]. Valorización, cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales, que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esta función en la instalación o en la economía general, ley 22/2011 28 Julio, [8].

Nuestros esfuerzos se centran en la industria de la construcción. En particular, en el proceso de fabricación de materiales a base de cemento. Es un elemento fundamental debido a su papel como componente de unión en diferentes mezclas. Para alcanzar un entorno sostenible, la producción de cemento tendrá que disminuir, por un lado, para minimizar la extracción de piedra caliza y, por otro, debido a las regulaciones sobre las emisiones de gases de efecto invernadero. Este hecho, unido al progresivo agotamiento de los recursos naturales, invita a la búsqueda de estrategias

que promuevan un consumo de árido más sostenible, minimizando las extracciones, a la vez que se reutilizan subproductos industriales como las escorias siderúrgicas, transformadas en áridos o adiciones tras su consiguiente valorización. Todo ello, con un efecto secundario no menos importante, como sería el de aprovechar la energía embebida en aquellos subproductos así valorizados.

Centrándonos en el cemento, las etapas de fabricación del clinker de cemento se pueden resumir en cuatro. La primera es la explotación de depósitos de materia prima, voladuras y posterior trituración de la roca. Luego comienza el proceso de homogeneización, mediante tecnología de suelo húmedo (agregando agua) o tierra seca. La mezcla cruda (mezcla de piedra caliza y arcilla o lutita) se muele y luego se calienta hasta la temperatura de sinterización (por encima de 1500 ° C) en un horno de cemento, donde se produce el clinker. En el proceso seco, el control químico es más eficiente y el consumo de energía es menor (al no tener que eliminar el agua agregada para mezclar los materiales), los hornos son más cortos y el clinker requiere menos tiempo de exposición a altas temperaturas. Por otro lado, la tecnología de molienda en húmedo es más eficiente con materiales duros. El clinker obtenido, sin importar el proceso utilizado, finalmente se tritura con pequeñas cantidades de yeso para obtener cemento.

A lo largo de todo el proceso, la liberación estimada de CO<sub>2</sub> durante la fabricación de clinker es de aproximadamente 0,7 a 0,95 toneladas por tonelada de cemento Portland, lo que significa que la industria del cemento genera entre el 7 y el 9% del CO<sub>2</sub> en todo el mundo. La disminución de estas emisiones es el desencadenante del notable interés de investigación en avanzar en la reducción de la dependencia de la industria del cemento [9–12]. Como alternativa al uso del cemento, se propone su reemplazo parcial por otros materiales. En este punto, la idea de valorización de los residuos existentes en la propia industria se vuelve importante.

Hoy en día, el crecimiento económico general ha estado acompañado por un aumento significativo en la demanda de acero. Esto conlleva un

aumento considerable de los subproductos y residuos industriales generados en su fabricación, como la escoria. Esta generación alcanza los 2,4 millones de toneladas por año, por lo que la acumulación de escoria es una forma de contaminación ambiental que debe tenerse en cuenta. Solo una pequeña fracción se utiliza como subproducto, mientras que el resto se desperdicia directamente, [13].

La escoria de acero es un subproducto de la fabricación de acero que se obtiene por las reacciones químicas que tienen lugar en los procesos de formación de metales [14]. Es una solución compleja de silicatos y óxidos producidos durante la separación del acero fundido de las impurezas. Las propiedades de la escoria producida por la industria del acero dependen en gran medida del proceso de fabricación.

Según Setién, 2008 [6], existen principalmente cuatro tipos de escoria de acero: “Escoria de horno de arco eléctrico (EAF)”, “Escoria de alto horno (BFS)”, “Escoria de horno de oxígeno básico (BOFS)” y “Escoria de horno de cuchara (LFS)” [15].

Entre los tipos de escorias, los EAF son más adecuados para fines de ingeniería. Las escorias EAF también se pueden dividir en dos tipos: oxidante o negro y reductor o blanco [16]. En un proceso habitual de fabricación de acero, la escoria negra producida por EAF es del orden de 120 kg por tonelada métrica, y la de EAF blanca es de aproximadamente 25 kg por tonelada métrica.

El aumento en el consumo de acero supone un aumento proporcional en la generación de residuos de esta escoria. Las estrategias de valorización de residuos de las escorias son diversas pero no suficientes para lograr en la práctica una reutilización real de éstas. Ya sea por problemas de regulación o económicos. Las escorias de acero se utilizan de muchas maneras, desde fertilizantes hasta en la industria civil. En la Unión Europea, se ha utilizado como aditivo para obtener cementos CEM II y CEM III. Las propiedades de la escoria las hacen muy apropiadas para ambientes agresivos. Las escorias mejoran su resistencia a las agresiones producidas por el agua

salada o los sulfatos (instalaciones marítimas). En las últimas décadas, los esfuerzos de investigación se han centrado en su uso como aditivos o como sustitutos agregados con áridos, tanto finos como gruesos, o como sustituto de áridos como aglomerantes bituminosos en la capa de pavimento [14,17–27].

Esta línea de investigación busca analizar la viabilidad técnica de reemplazar el cemento con escoria de la industria del acero [28], tanto para la producción de hormigón [29,30] como de lechada cementosa.

De las diferentes opciones de valorización de residuos, su incorporación en las lechadas es atractiva por las siguientes razones:

- Económicas, asociadas a una reducción de los costes de producción, de explotación de canteras y de comercio de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Técnicas, relativas a una mejora en las prestaciones de la lechada final.
- Ambientales, concernientes a una reducción de residuos presentes en el vertedero.

Por todo lo expuesto, es de esperar que a lo largo del siglo XXI se refuerce el uso de nuevas adiciones en los procesos de fabricación de lechadas comerciales. Siempre como consecuencia de las presiones ambientales, y un mayor desarrollo científico-tecnológico de la influencia de estas en las propiedades de las lechadas.

Estas nuevas incorporaciones pueden estar constituidas por adiciones minerales o subproductos industriales, que convenientemente tratados, se añaden en la dosificación de la lechada en proporciones definidas, para mejorar ciertas propiedades en su estado fresco (trabajabilidad y tiempos de fraguado) o en su estado endurecido (resistencias y/o durabilidad).

En estudios anteriores se encuentran algunas investigaciones recientes e interesantes en las que las lechadas están hechas con diferentes materiales. En 2015, Fatih Celik et al. [31] investigó la mezcla de ceniza de cáscara



de arroz en lechada a base de cemento. Las propiedades reológicas de la mezcla dan como resultado el aumento de la viscosidad aparente. F. Amahjour et al. (2002) [32] o Pastor et al (2016) [33] agregan cenizas volantes y humo de sílice para aumentar la resistencia mecánica. Otro campo de estudio es el análisis de parámetros como la clasificación de propiedades mecánicas en la arena Lim et al [34].

También hay estudios donde las sustituciones de escoria de alto horno se hacen en pequeños porcentajes pero siempre añadiendo aditivos o sustancias químicas. Reza Azadi et al. (2013) [35] trabajó con aditivos químicos para optimizar la lechada, usaron silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) para aumentar la resistencia, carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) para reducir el sangrado o trietanolamina (TEA) para promover la inyección. En 2017, Weijie Zhang introdujo silicato de sodio para un ajuste rápido [36].

Hay pocas referencias encontradas donde se utilice la escoria blanca LFS como sustituto del cemento y las escorias GGBFS en altos porcentajes, en la fabricación de hormigón y mucho menos en la fabricación de lechadas[15]. También encontramos algunos artículos que basan sus estudios en la sustitución de cementos por escorias o cenizas volantes [37–41].

Un referente lo encontramos en la patente del grupo ARHENE de la Universidad de Cádiz [29], la cual basa su invención en un procedimiento para la fabricación de hormigón mediante la adición de escorias de acero inoxidable de horno de arco eléctrico, o bien sustitución de parte del cemento por estas escorias, para la obtención de una formulación de hormigón especialmente indicada para la construcción de estructuras de contención y control, óptimamente sostenibles y más baratas.

## 1.2 Motivación y Objetivos de este trabajo

Las propiedades de las lechadas de cemento dependen en gran medida del tipo de cemento utilizado en su fabricación, por lo tanto es necesario tener

en consideración las propiedades físicas y mecánicas de las pastas de cemento.

En esta tesis doctoral, se intenta analizar las lechadas a base de cemento, hechas simplemente con agua, cemento Portland ordinario y escorias blancas, que contribuyan a la sostenibilidad.

Para cumplir con este objetivo la tesis se desarrolla en dos fases claramente diferenciadas. Una primera parte, donde se realizan sustituciones del cemento a partir de la lechada de cemento convencional, por tres diferentes escorias. Escoria de alto horno GGBFS y escorias de arco eléctrico de diferentes procedencias del territorio nacional LFS1 y LFS2. Una segunda parte, donde ya evaluada el tipo de escoria más eficiente, se utilizarán únicamente escorias GGBFS, con diferentes relación agua/cemento y diferentes cementos en cuanto a su clasificación por resistencia.

Esta tesis es novedosa, ya que, una vez consultada la bibliografía, se deduce que hay estudios acerca de lechadas de cementos realizadas con cemento CEM III, cemento con adición de escorias de alto horno en un 50%, y relaciones agua/cemento que oscila entre 0,4/1 y 0,5/1. No se han encontrado casos en los que se sustituyan cemento directamente por altos porcentajes de escoria de alto horno y escorias de arco eléctrico, y relaciones agua/cemento altas, 0,67/1 y 1/1, por lo que de obtener resultados satisfactorios, sería un gran avance en la valorización de residuos y del considerable ahorro económico que conllevaría utilizar este tipo de lechadas con una considerable reducción de utilización de cemento.

El objetivo en el que se basa esta tesis doctoral, justifica el procedimiento experimental seguido, y es la aplicación de un residuo industrial, escorias que se originan en distintas industrias siderúrgicas, encapsulada en una matriz cementosa, de un material compuesto como es la lechada, empleándola como conglomerante hidráulico, igualando o incluso mejorando las características de la lechada convencional.

En general, los objetivos de esta tesis pueden resumirse en:

1. Con relación a la primera parte de la investigación, un parámetro fundamental a analizar serán los diferentes comportamientos obtenidos según las características de la escoria. No solo por el origen dependiendo del tipo de acero fabricado, sino también por la influencia de los tratamientos posteriores a los que han sido sometidos. Para ello, se ha trabajado con escoria de diferentes orígenes dentro del país.
2. Con relación a la segunda parte, una vez evaluada la escoria que tiene mejor comportamiento en su utilización, se ha ampliado los porcentajes de sustitución y aumentado las variables como son el tipo de cemento y la relación agua/cemento, para evaluar el comportamiento de la lechada así originada.

Para comprobar la validez de las hipótesis planteadas, y en última instancia obtener una formulación útil del material de estudio, se realizarán los diferentes ensayos normalizados de los hormigones en estado endurecido [15].

### 1.3 Contenidos de la memoria

- **Capítulo 1: Introducción y antecedentes**

El capítulo 1 resume y sitúa el problema que justifica la investigación relativa a la presente tesis doctoral y repasando los antecedentes a la misma. Además, enuncia los objetivos generales, las hipótesis, y se detalla su estructura.

- **Capítulo 2: Cemento, Escorias y Lechadas de cemento**

En este capítulo se realiza un breve resumen de la historia del cemento y de los subproductos que se pueden obtener en la producción de acero, así como de las lechadas de cemento, hasta llegar a nuestros días, para poder tener una idea clara de los materiales utilizados en esta tesis.

- **Capítulo 3: Análisis experimental. Caracterización de los materiales y dosificación de las lechadas**

En este capítulo se caracterizan todos los materiales que se van a utilizar para la fabricación de las lechadas, realizando mayor énfasis en las diferentes escorias utilizadas, ya que es el material novedoso en esta tesis. Así mismo, se describen las dosificaciones y el método de elaboración de las mismas.

- **Capítulo 4: Fabricación y comprobación de lechadas con escorias GGBFS y LFS.**

Este capítulo responde al primero de los objetivos planteados, y establece las diferentes características que se obtienen con la nueva mezcla cementante, desarrollando los diferentes métodos utilizados para los distintos ensayos. En primer lugar, nos centraremos en las características físicas del material y veremos sus propiedades en estado fresco, fluidez y exudación; y una segunda parte en la que analizaremos el comportamiento mecánico de las mezclas, flexión y compresión.

- **Capítulos 5 : Fabricación y comprobación de lechadas con escorias GGBFS.**

Estos capítulos responden al segundo de los objetivos marcados y se centran en presentar de forma ordenada los resultados obtenidos para las propiedades en estado fresco de las lechadas; densidad, fluidez y exudación; así como el estudio de la expansividad de la escoria GGBFS y el lixiviado de la lechada; y también las propiedades mecánicas de las mismas, flexión y compresión.

- **Capítulo 6: Aplicación práctica de la nueva matriz cementante**

En este capítulo se reflejan los datos de los ensayos realizados en el Puerto de Valencia que se han elaborado por la empresa Geocisa, la cual nos ha

cedido los datos, para ver cómo funcionaba una vez puesto en servicio el material.

- **Capítulo 7: Conclusiones finales y futuras líneas de investigación**

Se establecen las conclusiones y resultados más relevantes surgidos a lo largo de la tesis doctoral. Finalmente, se plantean las líneas de investigación futuras que permitan seguir trabajando en aspectos relacionados con la sustitución de cementos por escorias, y que no hayan podido abordarse en el presente trabajo de investigación.

## 1.4 Bibliografía

1. Gudynas, E. Los derechos de la Naturaleza en serio. *Respuestas y aportes desde 2011*.
2. Meadows, H. D. Limits to Growth (Los límites del crecimiento). Nueva York: New American Library, 1972.
3. User *Eco -Etiquetado en el Mercosur: Potencialidades del enfoque regional en la adopción de modalidades de producción y consumo sustentables*;
4. Ortiz M., D. C.; Arévalo G., N. E. El Desarrollo Sostenible Y Desarrollo Sustentable: Concepto, Uso Y Pertinencia. *Univ. La Gran Colomb. (UGC), Fac. Contaduría Pública. Econ. y Magíster en Estud. y Gestión del Desarro.* **2014**, 1–15, doi:10.1042/BJ20100609.
5. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo Objetivos de Desarrollo Sostenible Available online: [https://www.unv.org/sites/default/files/unv\\_qa\\_on\\_SDGs\\_web\\_S.pdf](https://www.unv.org/sites/default/files/unv_qa_on_SDGs_web_S.pdf) (accessed on Feb 14, 2019).
6. Setién, J.; Hernández, D.; González, J. J. Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material. *Constr. Build.*

- Mater.* **2009**, 23, 1788–1794, doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.10.003.
7. Jefatura Del Estado LEY 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. 2007, 46962–46987.
  8. Jefatura Del Estado LEY 22/2011, de 28 de Julio, de residuos y suelos contaminados. 2011, BOE-A-2011-13046.
  9. Bilim, C.; Ati, C. D. Alkali activation of mortars containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag. *Constr. Build. Mater.* **2012**, 28, 708–712, doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.018.
  10. Hannesson, G.; Kuder, K.; Shogren, R.; Lehman, D. The influence of high volume of fly ash and slag on the compressive strength of self-consolidating concrete. *Constr. Build. Mater.* **2012**, 30, 161–168, doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.11.046.
  11. Özodabaş, A.; Yilmaz, K. Improvement of the performance of alkali activated blast furnace slag mortars with very finely ground pumice. *Constr. Build. Mater.* **2013**, 48, 26–34, doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.06.047.
  12. Rashad, A. M. A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali-activated slag - A guide for Civil Engineer. *Constr. Build. Mater.* **2013**, 47, 29–55, doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.04.011.
  13. Ámbito, E. L.; Concreto, D. E. L.; Materias, N.; En, P.; Ámbito, E. L.; Concreto, D. E. L. La “Transmutación” Sostenible de los Residuos. *Dyna* **2012**, 79, 38–47.
  14. M Boza - Cuba: Universidad de Holguín Utilización de las escorias de acería como material de construcción. **2011**.
  15. Parron-Rubio, M.; Perez-García, F.; Gonzalez-Herrera, A.; Rubio-Cintas, M. Concrete Properties Comparison When Substituting a 25% Cement with Slag from Different Provenances. *Materials (Basel)*. **2018**, 11, 1029, doi:10.3390/ma11061029.

16. Amaral, L. Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental. **1999**.
17. Gökalp, İ.; Uz, V. E.; Saltan, M.; Tutumluer, E. Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer applications. *Transp. Geotech.* **2018**, *14*, 61–69, doi:10.1016/j.trgeo.2017.10.003.
18. Rubio Cintas, M. D.; Parrón Vera, M. A.; Contreras de Villa, F. Nuevos usos de las escorias y polvos de humo provocados por la siderurgia. *An. Ing. mecánica* **2008**, *16*, 1233–1238.
19. Nishigaki, M. Producing permeable blocks and pavement bricks from molten slag. *Stud. Environ. Sci.* **1997**, *71*, 31–40, doi:10.1016/S0166-1116(97)80186-0.
20. Rubio, M. D.; Parrón, M. A.; Contreras, F. Resistencia mecánica de hormigones con sustitución de un porcentaje de cemento por polvos de humo de sílice y escoria de horno de arco eléctrico. *ResearchGate* **2011**, 0–10.
21. Hadjsadok, A.; Kenai, S.; Courard, L.; Michel, F.; Khatib, J. Durability of mortar and concretes containing slag with low hydraulic activity. *Cem. Concr. Compos.* **2012**, *34*, 671–677, doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.02.011.
22. Lam, M. N. T.; Jaritngam, S.; Le, D. H. Roller-compacted concrete pavement made of Electric Arc Furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *154*, 482–495, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.07.240.
23. Xue, Y.; Wu, S.; Hou, H.; Zha, J. Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture. *J. Hazard. Mater.* **2006**, *138*, 261–268, doi:10.1016/j.jhazmat.2006.02.073.
24. Behiry, A. E. A. E. M. Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as subbase material in flexible pavement. *Ain*

- Shams Eng. J.* **2013**, 4, 43–53, doi:10.1016/j.asej.2012.07.006.
25. Sas, W.; Gluchowski, A.; Radziemska, M.; Dziecioł, J.; Szymański, A. Environmental and geotechnical assessment of the steel slags as a material for road structure. *Materials (Basel)*. **2015**, 8, 4857–4875, doi:10.3390/ma8084857.
  26. Mahmoud, E.; Ibrahim, A.; El-Chabib, H.; Patibandla, V. C. Self-Consolidating Concrete Incorporating High Volume of Fly Ash, Slag, and Recycled Asphalt Pavement. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* **2013**, 7, 155–163, doi:10.1007/s40069-013-0044-1.
  27. Hybská, H.; Hroncová, E.; Ladomerský, J.; Balco, K.; Mitterpach, J. Ecotoxicity of concretes with granulated slag from gray iron pilot production as filler. *Materials (Basel)*. **2017**, 10, 505, doi:10.3390/ma10050505.
  28. Kim, J. H.; Lee, H. S. Improvement of early strength of cement mortar containing granulated blast furnace slag using industrial byproducts. *Materials (Basel)*. **2017**, 10, 1050, doi:10.3390/ma10091050.
  29. Rubio Cintas, M. D.; Parrón Vera, M. A.; Contreras, F. Rubio, M.D.; Parrón, M.A.; Contreras, F. Method for producing cinder concrete. ES20130000758 20130803. 3 June 2015. 2015.
  30. Ortega, J. M.; Albaladejo, A.; Pastor, J. L.; Sánchez, I.; Climent, M. A. Influence of using slag cement on the microstructure and durability related properties of cement grouts for micropiles. *Constr. Build. Mater.* **2013**, 38, 84–93, doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.08.036.
  31. Celik, F.; Canakci, H. An investigation of rheological properties of cement-based grout mixed with rice husk ash (RHA). *Constr. Build. Mater.* **2015**, 91, 187–194, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.05.025.
  32. Amahjour, F.; Pardo, P.; Borrachero, M. V Propiedades De Lechadas De Cemento Fabricadas Con Cementos De Tipo I Y Mezclas Con Cenizas Volantes (Cv) Y Humo De Sílice (Hs). *VIII*



- Congr. Nac. Propiedades Mec. Sólidos* **2002**, 729–737.
33. Pastor, J. L.; Ortega, J. M.; Flor, M.; López, M. P.; Sánchez, I.; Climent, M. A. Microstructure and durability of fly ash cement grouts for micropiles. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *117*, 47–57, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.154.
  34. Lim, S. K.; Tan, C. S.; Chen, K. P.; Lee, M. L.; Lee, W. P. Effect of different sand grading on strength properties of cement grout. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *38*, 348–355, doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.08.030.
  35. Azadi, M. R.; Taghichian, A.; Taheri, A. Optimization of cement-based grouts using chemical additives. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* **2017**, *9*, 623–637, doi:10.1016/j.jrmge.2016.11.013.
  36. Zhang, W.; Li, S.; Wei, J.; Zhang, Q.; Liu, R.; Zhang, X.; Yin, H. Grouting rock fractures with cement and sodium silicate grout. *Carbonates and Evaporites* **2018**, *33*, 211–222, doi:10.1007/s13146-016-0332-3.
  37. Ferraris, C. F.; Obla, K. H.; Hill, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cem. Concr. Res.* **2001**, *31*, 245–255, doi:10.1016/S0008-8846(00)00454-3.
  38. Neves Junior, A.; Filho, R. D. T.; Fairbairn, E. de M. R.; Dweck, J. A study of the carbonation profile of cement pastes by thermogravimetry and its effect on the compressive strength. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2014**, *116*, 69–76, doi:10.1007/s10973-013-3556-7.
  39. Xuequan, W.; Hong, Z.; Xinkai, H.; Husen, L. Study on steel slag and fly ash composite Portland cement. *Cem. Concr. Res.* **1999**, *29*, 1103–1106, doi:10.1016/S0008-8846(98)00244-0.
  40. Tsakiridis, P. E.; Papadimitriou, G. D.; Tsivilis, S.; Koroneos, C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *J. Hazard. Mater.* **2008**, *152*, 805–811,

doi:10.1016/j.jhazmat.2007.07.093.

41. Rubio-Cintas, M. D.; Barnett, S. J.; Perez-García, F.; Parron-Rubio, M. E. Mechanical-strength characteristics of concrete made with stainless steel industry wastes as binders. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *204*, 675–683, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.166.



## **CAPÍTULO 2**

### **Cemento, escorias y lechadas de cemento**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## ÍNDICE

2.1 Cemento Portland.....	29
2.1.1 Clasificación de los cementos. ....	30
2.1.1.1 Cemento Portland. Tipo I.....	31
2.1.1.2 Cemento Portland. Tipo II-F.....	31
2.1.1.3 Cemento Portland. Tipo II-S.....	31
2.1.1.4 Cemento Portland. Tipo II-Z .....	32
2.1.1.5 Cemento Portland. Tipo II-S/Z .....	32
2.1.1.6 Cementos de alto horno. Tipo III.....	32
2.1.1.7 Cementos puzolánicos. Tipo IV.....	32
2.1.1.8 Cementos mixtos. Tipo V .....	32
2.1.2 Materiales que conforman los cementos. ....	34
2.1.3 Proceso de Fabricación del cemento. ....	38
2.1.3.1 Extracción de Materiales .....	38
2.1.3.2 Molienda de Materiales .....	40
2.1.3.3 Prehomogeneización y homogeneización.....	41
2.1.3.4 Elaboración del clínker .....	41
2.1.3.4.1 Precalentamiento.....	41
2.1.3.4.2 Calentamiento o sintetización.....	42
2.1.3.4.3 Molienda y acabado .....	43
2.2 Escorias .....	44
2.2.1 Escorias de alto horno (Blast Furnace Slag) .....	45
2.2.1.1 Propiedades de la escoria granulada (GGBFS).....	47
2.2.2 Escoria de acería de Horno de Arco Eléctrico (Electric Arc furnace Slags-EAF Slags) .....	48
2.2.2.1 Escoria blanca, LFS .....	51
2.3 Lechadas de cemento .....	54
2.3.1 Tipos de inyección con lechadas.....	55

2.3.1.1 Inyección de partículas (Impregnación):.....	55
2.3.1.2 Jet Grouting:.....	56
2.3.1.3 Inyecciones de Compactación.....	57
2.3.1.4 Inyecciones de Compensación.....	58
2.3.2 Características principales de las lechadas de cemento .....	59
2.4 Bibliografía.....	60

## TABLAS

<i>Tabla 2. 1 : Cementos comunes y composiciones. RC-08.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 2. 2: Prescripciones mecánicas y físicas de los cementos comunes. (1) R= Alta resistencia inicial. RC-08.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 2. 3:Proceso de Fabricación del Cemento .....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 2. 4: Composición química promedio de la escorias GGBFS.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 2. 5: Composición química escorias blancas (LFS).....</i>	<i>53</i>

## FIGURAS

<i>Figura 2. 1: Extracción de materiales.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 2. 2: Cintas transportadoras .....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 2. 3: Molino de bolas.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 2. 4: Horno intercambiador de ciclones y precalcinador.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 2. 5: Proceso de fabricación del cemento.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 2. 6: Formas de producción en la Industria Siderúrgica.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 2. 7: Escorias de alto horno .....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 2. 8: Horno eléctrico de arco, Horno de cuchara. ....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 2. 9: Proceso de fabricación de acero con hornos de EAF-LF .....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 2. 10: Relación agua/cemento dependiendo de la aplicación.....</i>	<i>60</i>

## 2.1 Cemento Portland

Para conocer el significado del término “cemento”, hay que remontarse al origen etimológico del mismo. La palabra procede del latín “caementun”, término que proviene de “caedere” que es sinónimo de cortar.

Los etruscos, hacia el año 700 a. C, ya realizaban morteros con mezclas de puzolana y cal, son los primeros datos de evocación al Cemento. La pirámide de Keops fue construida con mortero de sulfato cálcico, carbonato cálcico, sílice, alúmina, carbonato magnésico y óxido de hierro. En la India, se fabricaban morteros de cal grasa, azúcar y leche. Pero no fue hasta el Imperio Romano cuando se utilizó un mortero fabricado a partir de tierra volcánica, puzolana, (muy abundante cerca de Roma), mezclada con cal calcinada. Lo más importante que aprendieron los romanos es la propiedad puzolana para endurecer los morteros de cal grasa, hasta el estado pétreo incluso cuando están sumergidos. Fue el primer cemento resistente al agua o mortero hidráulico. Este cemento, se mezclaba con ladrillo y piedras, para formar hormigón, al que se le daba la forma deseada mediante encofrados realizados en madera, una técnica que aún subsiste. Este material resistente al fuego y que fraguaba incluso bajo el agua, aligeraba las contracciones, por lo que permitía la realización de grandes cúpulas y bóvedas de hormigón. El uso del cemento y el hormigón cesaron tras la desaparición de las técnicas constructivas romanas, y no volvieron a utilizarse hasta varios siglos más tarde [1].

En el siglo XVIII, el británico, John Smeaton, diseñó un faro en Gran Bretaña. Ante la necesidad de un material resistente al agua, recuperó el antiguo cemento romano, añadiendo a la cal, la conocida tierra volcánica de puzolana y otros aditivos que le conferían características hidráulicas. Este tipo de cemento natural fue muy utilizado hasta finales del siglo XIX; con él se realizaron grandes obras públicas, dado que aprovecharon los yacimientos naturales de caliza mezclada con arcilla.



En la actualidad, al cemento formado por material calcáreo y arcilla se le denomina cemento hidráulico. Entre ellos el más conocido es el cemento de Pórtland o cemento Pórtland, cuyo color grisáceo recuerda a la tonalidad de las piedras que se obtienen de las canteras de la isla de Pórtland (Inglaterra).[2]

La definición que mejor lo encuadra sería “Los cementos son aglutinantes hidráulicos, compuestos artificiales inorgánicos, que después de ser molidos y amasados con agua, forman una pasta que fragua y endurece a consecuencia de reacciones de hidrólisis e hidratación de sus componentes, obteniéndose productos hidratados, resistentes, desde el punto de vista mecánico y estables y que goza de la propiedad de endurecerse después de entrar en contacto con el agua”. Al producto resultante de la molienda de estos compuestos inorgánicos (mayoritariamente rocas) se le denomina clinker y se convierte en cemento cuando se le agrega una pequeña cantidad de yeso para evitar la contracción de la mezcla al fraguar cuando se le añade agua y al endurecerse posteriormente [3].

### 2.1.1 Clasificación de los cementos.

Los cementos que se utilizan habitualmente en España se reflejan en la Instrucción para la recepción de cementos RC-08 [4] que establece las prescripciones técnicas generales que deben satisfacer los cementos. En el anejo 1 de dicha instrucción [4], aparece la composición, designación, prescripciones y normas de referencia de los cementos sujetos al marcado CE.

Se clasifican en:

- Cementos comunes (EN-197-1:2011)[5].
- Cementos de escorias de alto horno de baja resistencia inicial (EN-197-4:2005) [6].
- Cementos especiales de muy bajo calor de hidratación (EN 14216:2015)[7]
- Cementos de aluminato de calcio (EN 14647:2006)[8].

- Cementos de albañilería (UNE-EN 413-1:2011) [9].

Estos a su vez se clasifican en diferentes tipos, según sus componentes, y en clases, según su resistencia. El número que identifica a la clase corresponde con la resistencia mínima a compresión, a veintiocho días, expresada en MPa. En lo que se refiere a la clase se exceptúan los cementos para usos especiales donde dicha resistencia se refiere a los noventa días.

Centrándonos en los cementos comunes, en la Tabla 1.1 se refleja su composición promedio. Se puede observar que existen 27 cementos comunes agrupados en cinco tipos principales:

#### **2.1.1.1 Cemento Portland. Tipo I**

Formados principalmente a base de clínker de Pórtland, en una proporción de al menos el 95% en masa, sin incluir en este porcentaje ni los aditivos ni los reguladores de fraguado.

#### **2.1.1.2 Cemento Pórtland. Tipo II-F**

En estos cementos la base de clínker no puede ser menor del 85% ni mayor del 95% en masa, y el filler calizo no puede ser superior al 15% ni inferior al 5% en masa, al igual que los anteriores sin tener en cuenta ni regulador ni aditivos.

#### **2.1.1.3 Cemento Pórtland. Tipo II-S**

Iguales que los anteriores, pero con clínker Pórtland al menos del 65% y no mayor del 90% en masa. Éstos poseen adición de escoria granulada de alto horno en una proporción que puede variar del 10 al 35% en masa y adición de otros materiales definidos en la norma EN 197-1 [5] cuya proporción total no sea mayor del 5% en masa, igualmente sin contar el regulador ni aditivos.

#### **2.1.1.4 Cemento Pórtland. Tipo II-Z**

La base de clinker de Pórtland debe estar entre el 65 y el 90% en masa, en este caso se adicionan puzolanas naturales, cenizas volantes y otros materiales puzolánicos cuyo porcentaje en masa debe estar entre el 10 y el 35%, así mismo no deben adicionarse además más del 5% en masa de otros materiales, igualmente sin contar reguladores y aditivos.

#### **2.1.1.5 Cemento Pórtland. Tipo II-S/Z**

En este caso la proporción de clinker de Pórtland estará entre 65 y el 88% de masa, además se adicionará escorias granuladas de alto horno (entre 6 y el 29% en masa), pudiéndose adicionar puzolanas, cenizas volantes y otros materiales puzolánicos que no deben superar entre el 6 y el 29% en masa, y el resto de los constituyentes en proporción no superior al 5% en masa, sin reguladores ni aditivos.

#### **2.1.1.6 Cementos de alto horno. Tipo III**

Los que el clinker de Pórtland estará presente entre el 20 y el 64% en masa, adición de escoria granulada de alto horno, entre el 36 y el 80% en masa, y al igual que en los demás, los otros constituyentes no deben superar el 5% en masa, sin reguladores ni aditivos.

#### **2.1.1.7 Cementos puzolánicos. Tipo IV**

El clinker Pórtland no superará el 60% en masa, con adición de puzolanas, cenizas volantes u otros materiales puzolánicos llegando a sumar el 40% en masa. Los demás constituyentes hasta el 5% en masa. Igual que los anteriores no incluye ni regulador de fraguado ni aditivos.

#### **2.1.1.8 Cementos mixtos. Tipo V**

Por último, estos cementos están compuestos por clinker de Pórtland en

una proporción no menor del 20% ni superior al 60% en masa, y con un máximo de filler calizo del 5%. El resto de la mezcla la deben componer puzolanas, o una mezcla de escorias de alto horno con puzolanas, en una proporción no superior al 6%.

En la Tabla 2.1 se puede observar la clasificación de estos cementos [4].

Tipo de cemento	Denominación	Designación	Clinker K	Escoria de Horno alto S	Humo de Sílice D	Puzolanas Naturales P	Cenizas Volantes V	Caliza L	Componentes Minoritarios Adiciones (2)
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento Portland con escoria	CEM II/A-S CEM II/B-S	80-94 65-79	6-20 21-35	- -	- -	- -	- -	0-5 0-5
	Cemento Portland con humo de sílice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	CEM II/A-P CEM II/B-P	80-94 65-79	- -	- -	6-20 21-35	- -	- -	0-5 0-5
	Cemento Portland con ceniza volante	CEM II/A-V CEM II/B-V	80-94 65-79	- -	- -	- -	6-20 21-35	- -	0-5 0-5
	Cemento Portland con caliza	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	6-20	0-5
	Cemento Portland Mixto (3)	CEM II/A-M CEM II/B-M	80-94 65-79	-	-	6-20 21-35	(4) (5) (4)(5)(6)	-	-
	Cemento de horno alto	CEM III/A CEM III/B	35-64 20-34	36-65 66-80	- -	- -	- -	- -	0-5 0-5
CEM IV	Cemento Puzolánico	CEM IV/A	65-89	-	-	11-35 (4)	-	-	0-5
		CEM IV/B	45-64	-	-	36-55 (4)	-	-	0-5
CEM V	Cemento Compuesto	CEM V/A	40-64	18-30	-	18	30	-	0-5

Tabla 2. 1 : Cementos comunes y composiciones. RC-08

Es importante mencionar que los porcentajes en masa de los distintos tipos de cemento excluyen el regulador de fraguado y los eventuales aditivos. Por otro lado, no hay que confundir los aditivos al cemento con las adiciones, éstas se refieren siempre a uno o varios de los siguientes

constituyentes: Clínter del cemento Portland (K), escoria granulada de alto horno (S), puzolanas naturales (P) y calcinadas (Q), cenizas volantes síliceas (V) y calcáreas (W), equisto calcinado (T), caliza (L) y caliza de bajo contenido de carbono orgánico total (LL) y por último humo de sílice (D).

Los componentes minoritarios adicionales pueden ser “filler”, o uno o más de los componentes principales, a menos que están incluidos ya como tales en el cemento. Cuando algún cemento Portland, mixto, en razón de su composición, se pueda incluir en alguno de los tipos II, deberá llevar la denominación y designación correspondiente. La proporción de humo de sílice se limita al 10%. La proporción de “filler” se limita al 5% y la proporción de caliza se limita al 20%.

Las características de este tipo de cementos están reguladas en la RC-08 [4] y se incluyen en la Tabla 2.2.

Clase resistente	Resistencia a compresión N/mm <sup>2</sup>				Tiempo de fraguado		Expansión
	Resistencia inicial		Resistencia normal		Principio	Final	
	Dos días	Siete días	Veintiocho días	Noventa días	Minutos	Horas	
32,5	—	≥16,0	≥32,5	≥52,5			
32,5 R (1)	≥13,5	—			≥60		
42,5	≥13,5	—	≥42,5	≥62,5		≤12	
42,5 R (1)	≥20,0	—					≤10
52,5	≥20,0	—	≥52,5				
52,5 R (1)	≥30,0	—			≥45		

Tabla 2. 2: Prescripciones mecánicas y físicas de los cementos comunes. (1) R= Alta resistencia inicial. RC-08

Para designar un cemento Portland con adición de escoria y de resistencia 42,5 MPa, en la tabla nos encontramos ante un CEM II/A-S 42,5 y CEMII/B-S 42,5 según la norma EN 197-1 [5].

### 2.1.2 Materiales que conforman los cementos.

A continuación, se muestran los materiales que pueden formar parte de los cementos que, en función de las dosificaciones en que se adicionen y se

muelan conjuntamente darán lugar a los distintos tipos de cementos:

- ❖ **Clínteres aluminosos:** Se obtienen por fusión de una mezcla de calizas y bauxitas, obteniendo una mezcla resultante con una composición con más del 32% de alúmina y con menos del 20% de óxido de hierro. Son de una gran finura y estables en cuanto a volumen. La duración del fraguado es, lo que podríamos llamar fraguado lento, ya que después de ser amasado no empieza a endurecer hasta por lo menos dos horas.; pero suele terminar antes alrededor de las cuatro horas. Las propiedades con más relevancia en estos clínteres son la resistencia mecánica a corto plazo, la resistencia a los ataques de ácidos y la resistencia a los ambientes agresivos (sulfatosos y marinos). Las reacciones del fraguado del Cemento Aluminoso desprenden mucho calor, por lo que también son importantes para hormigonados en zonas muy frías. [10]
- ❖ **Clínteres Portland:** Como ya se ha comentado anteriormente son el resultado de la calcinación de mezclas de piedra caliza y arcilla u otros materiales de composición similar y suficiente reactividad, a una temperatura aproximada de 1450 °C. Durante este proceso se produce la fusión parcial de los materiales formados y se forman los nódulos de clínter. Posteriormente se le adiciona sulfato de calcio para molerlo y obtener cemento. El sulfato de calcio se adiciona en forma de yeso normalmente, aunque también de otras formas, influyendo en la resistencia mecánica y la velocidad de fraguado. Algunas especificaciones permiten la adición de otro material en la etapa de molienda. [11–13]
- ❖ **Puzolanas naturales (P/Q):** Principalmente son rocas tobáceas, volcánicas vítreas, de naturaleza traquítica alcalina o pumítica. Forman compuestos con propiedades hidráulicas cuando se ponen en contacto sus constituyentes, normalmente sílice y alúmina, a la temperatura ambiente y en presencia de agua. En sentido amplio, el término puzolana se aplica también a otros productos artificiales, o naturales de origen no volcánico, que tienen análogas propiedades, como la

tierra de diatomeas y las arcillas activas. Confiere al cemento mayor durabilidad química por resistencia a ataques por aguas puras, carbónicas, agresivas o con débil acidez. Le confieren a los cementos mayor compacidad e impermeabilidad, menos calor de hidratación y también inhiben o contrarrestan las expansiones producidas por la presencia de cal libre, magnesia libre, etc.[14].

Las puzolanas naturales calcinadas, son de origen volcánico, pizarras, arcillas o rocas sedimentarias activadas mediante tratamiento térmico.

- ❖ **Escorias siderúrgicas (S):** Son subproductos resultantes de la combinación de las gangas de los minerales metálicos, o del refinado de los metales, con los fundentes y materiales de afino empleados en los distintos procesos metalúrgicos.

Las escorias más utilizadas son las siderúrgicas. En este capítulo, posteriormente se entrará en detalle, ya que son el material imprescindible con el que se ha llevado a cabo esta tesis.

- ❖ **Cenizas volantes (V):** En el proceso de combustión en los quemadores de las centrales termoeléctricas que se alimentan por carbones pulverizados, se generan residuos sólidos a los que conocemos como cenizas volantes. Se recogen por captación mecánica o por precipitación electrostática. Nos podemos encontrar con cenizas volantes de naturaleza calcárea, con propiedades puzolánicas e hidráulicas, o con naturaleza silíceas que también tienen propiedades puzolánicas. Estas cenizas pueden tener pérdidas por calcinación, determinadas conforme a la norma EN 196-2 [15], pero empleando un tiempo de calcinación de 1 hora no excederá del 5% en masa. Cuando la pérdida por calcinación sea del 5% al 7% en masa, se aceptarán con la condición de que se cumplan las exigencias de durabilidad conforme a los reglamentos en vigor para hormigones o morteros de los lugares en donde se utilicen, especialmente en lo que concierne a la resistencia al hielo-deshielo y la compatibilidad con los aditivos. En este último caso, se deberá indicar sobre el envase y/o en los albaranes el límite máximo del 7% en masa.

- ❖ **Humo de sílice (D):** El humo de sílice se origina por la reducción de cuarzo de elevada pureza con carbón en hornos de arco eléctrico, para la producción de silicio y aleaciones de ferrosilicio, y consiste en partículas esféricas muy finas conteniendo al menos el 85% en masa de sílice amorfa. Consta de partículas muy finas y principalmente esféricas, el humo de sílice tiene una densidad aparente baja. Esta es la razón por la que este material se compacta o se granula antes de su transporte, o se maneja como si fuera lechada (dispersión en agua) cuando se utiliza como aditivo del hormigón. Suele tener una marcada reactividad puzolánica. Reacciona con el hidróxido cálcico para formar SCH. Además de su utilización como componente principal del cemento. El humo de sílice se utiliza también como adición en hormigón de alta resistencia. La finura extrema de este incrementa la demanda de agua de la pasta, del mortero y del hormigón. Así pues, es necesaria la utilización de aditivos reductores de agua.
- ❖ **Filleres calizos (L):** Son compuestos principalmente de carbonato cálcico en forma de calcita (superior al 85 %), que molidos conjuntamente con el clínker Pórtland, en proporciones determinadas, afectan favorablemente a las propiedades y comportamiento de los morteros y hormigones, tanto frescos como endurecidos. Su acción principal es de carácter físico: trabajabilidad, dispersión, hidratación, capilaridad, fisuración, permeabilidad, retracción, retención de agua.
- ❖ **Reguladores de fraguado:** Son materiales naturales o productos artificiales que añadidos a los clínkeres Pórtland y a otros constituyentes del cemento, en pequeñas proporciones, y molidos conjuntamente, proporcionan cementos con un fraguado adecuado. El regulador más común es el sulfato cálcico en alguna de sus variedades, al ser utilizado como regulador de fraguado las impurezas que pudieran acompañar a ese subproducto no deberán afectar desfavorablemente a los procesos de fraguado y de endurecimiento, ni a las propiedades y comportamiento de los conglomerados frescos o endurecidos.
- ❖ **Aditivos:** Son productos que pueden emplearse en la fabricación del



cemento, para facilitar el proceso de molienda o bien para aportar al cemento o a sus derivados algún comportamiento específico (inclusores de aire). La dosificación de los aditivos debe ser inferior al 1 por 100 en masa. No debe confundirse con los aditivos del hormigón.

### 2.1.3 Proceso de Fabricación del cemento.

En el proceso de producción del cemento se identifican diferentes fases en el proceso, en la Tabla 2.3 se ve de forma esquemática dicho proceso [3].

Materias primas			
↓			
Extracción			
↓			
Machaqueo			
Vía húmeda Dilución y Dosificación			Vía seca Dosificación y secado
Molienda			
↓			
Homogeneización			
Vía húmeda	Vía semihúmeda	Vía semiseca	Vía seca
	Filtración		
	Extrusión	Granulación	
Secado (Horno rotatorio)	Secado(Parrillas)	Secado(Parrillas)	Secado(Parrillas)
↓	↓	↓	↓
Clinkerización			
↓			
Molienda y adiciones			
↓			
Cemento			

Tabla 2. 3:Proceso de Fabricación del Cemento

#### 2.1.3.1 Extracción de Materiales

Para comenzar la fabricación del cemento, se realiza la extracción de los materiales necesarios, que comienzan en la mina. La explotación minera es siempre al aire libre y los materiales se extraen mediante máquinas perforadoras y detonaciones. Posteriormente, éstos son

transportados por camiones o cintas a la fábrica de cemento para ser triturados. En este proceso se diferencian dos etapas, una primera donde se procesa en una chancadora primaria para reducirla de tamaño (entre 1,5m y 25 cm) y posteriormente se deposita en un parque de almacenamiento para seguidamente, después de verificar su composición química, realizar una trituración secundaria para reducir su tamaño a 2mm aproximadamente, [16]. Figura 2.1.



*Figura 2. 1: Extracción de materiales*

El material triturado se lleva a la planta por cintas transportadoras, depositándose en un parque de materias primas. En algunos casos se efectúa un proceso de pre-homogeneización, Figura 2.2.



*Figura 2. 2: Cintas transportadoras*

Este material es almacenado en un silo, del que se alimenta el molino de crudo. Hay dos silos más con los materiales correctivos (minerales de hierro y caliza correctiva alta). Se dosifica dependiendo de sus características. Los estudios de la composición de los materiales en las distintas zonas de cantera y los análisis que se realizan en la fábrica permiten dosificar la mezcla de materias primas para obtener la composición deseada.

### 2.1.3.2 Molienda de Materiales

La molienda se efectúa principalmente con molinos de bolas de metal, tubulares. Se componen de un tubo cilíndrico apoyado en cojinetes, en el interior están las bolas que machacan lo minerales, los cuales, al entrar por un extremo y gracias a la rotación del molino, la harina o polvo resultante de la trituración de los materiales, salen por el otro extremo, Figura 2.3.

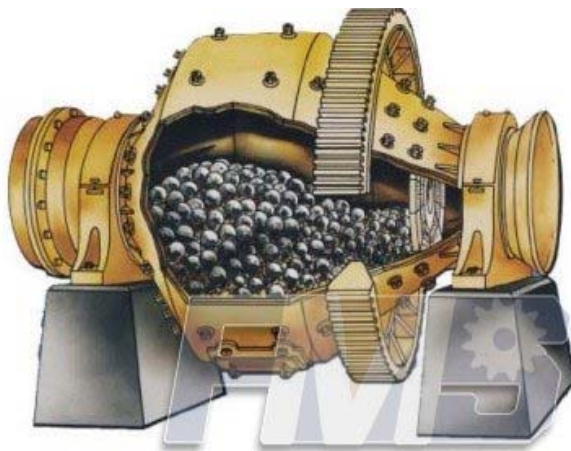


Figura 2. 3: Molino de bolas

La molienda es uno de los procesos productivos más importantes. La razón por la que se considera esto, es que depende tanto la cocción de los materiales, como la consecución de un clínker que se aglomere con el agua. Si el material no se tritura de forma correcta, no se producirá la materia

prima apropiada por el excesivo grosor no pudiendo pasar a la fase de homogeneización.

### **2.1.3.3 Prehomogeneización y homogeneización**

Consiste en formar una mezcla de materiales determinados para la obtención del clínker. Este proceso se puede realizar por vía húmeda o seca.

Por vía húmeda, es necesario añadir agua, por el contrario, por vía seca, el ahorro energético es mayor y no precisa secado posterior de la mezcla. Este proceso está en desuso sustituyéndose por molinos autógenos de gran diámetro, barridos por aire que son más aptos para la molienda y secado conjuntos de materias primas muy húmedas y pegajosas [17].

Una vez conseguida la mezcla se procede a la homogeneización, que consiste en añadir las proporciones correctas de materias primas para la elaboración del clínker. Este proceso se puede realizar de forma continua o discontinua.

De una buena homogeneización depende la calidad del cemento, ya que la composición química de los crudos que se añaden en esta fase, es la que da las diferentes propiedades de aglomerante.

### **2.1.3.4 Elaboración del clínker**

Una vez seleccionada la materia prima necesaria, comienza la cocción de la mezcla homogeneizada, al producto obtenido se le denomina clínker. La elaboración se obtiene con dos subprocesos:

#### **2.1.3.4.1 Precalentamiento**

Se puede realizar por vía semihúmeda o por vía semiseca. En la primera, la pasta obtenida debe sufrir posteriormente una operación de filtrado, mientras que, por la segunda, sólo se requiere la granulación de la pasta. Esta granulación influye directamente en las propiedades del cemento (trabajabilidad, docilidad, resistencia, etc.) y en su comportamiento a lo

largo del tiempo. Independientemente del proceso que se elija hay que proceder al secado del material, si se realizó por vía semihúmeda, precalentando la mezcla, mientras que, si se optó por el proceso de vía semiseca, la mezcla se precalienta en una parrilla con corriente cruzada con los gases de escape del horno (generando menos problemas ambientales). En el proceso de vía seca se usan precalentadores de cadenas, de ciclones o ciclónicos de cuatro etapas. Figura 2.4.

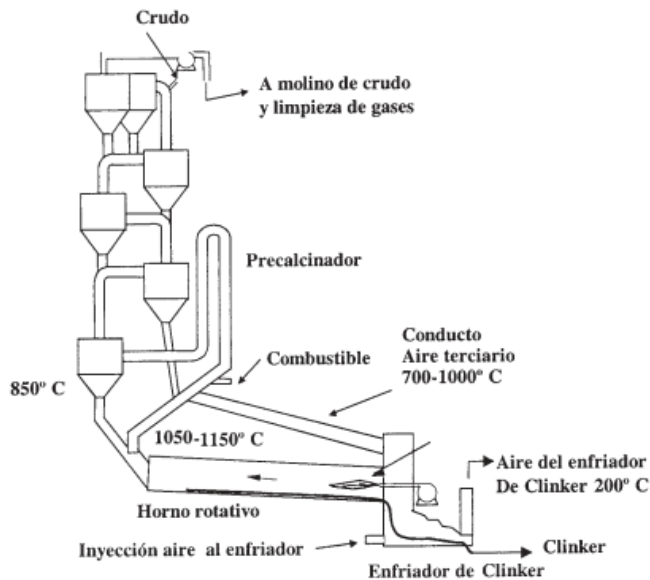


Figura 2. 4: Horno intercambiador de ciclones y precalcinador

#### 2.1.3.4.2 Calentamiento o sintetización

Este proceso es el que provoca las reacciones físico-químicas por las que pasa a medida que se va calentando:

- Secado, hasta una temperatura de 150°C.
- Eliminación del agua de constitución de la arcilla hasta unos 500°C.
- Descarbonatación, desde 550°C, hasta unos 1100°C.
- Clinkerización entre 1300°C y 1500°C.

La sintetización del cemento se produce por encima de los 1250°C. A veces, en esta fase del proceso productivo se añaden al clínker fundentes y mineralizadores con el objetivo de ahorrar energía. Sobre todo, cuando el clínker tiene un alto contenido en cal.

Posteriormente hay que enfriar el clínker, este proceso se puede realizar con:

- Enfriadores de satélites, que se aplican por medio de una corriente de aire. Es un sistema sencillo y que no contamina.
- Enfriadores de parrilla, el clínker se transporta en una parrilla y se refrigera por aire, parte de ese aire es utilizado como aire secundario de combustión del horno.

#### **2.1.3.4.3 Molienda y acabado**

Una vez enfriado el clínker, debe ser molido nuevamente y a partir de aquí, es cuando se le puede añadir yeso y otras adiciones para conseguir cemento, de estas adiciones dependerá la calidad y el tipo de cemento que se quiera fabricar.

Lo más adecuado es moler el clínker y las adiciones por separado, para de esta forma obtener mezclas más homogéneas. En este proceso no se necesita aumentar la temperatura, ya que el clínker sale a 1300°C aproximadamente.

Una vez concluidas todas las fases, el resultado obtenido es el cemento. En la siguiente imagen se muestra todo el proceso de forma más gráfica, Figura 2.5.

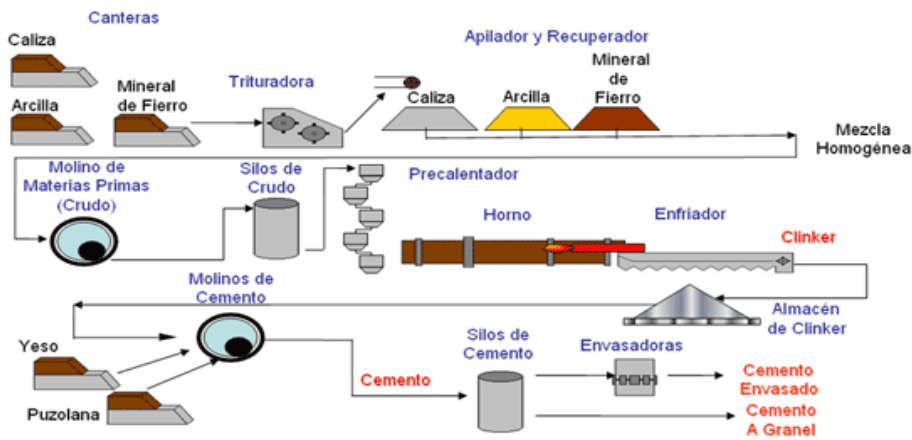


Figura 2. 5: Proceso de fabricación del cemento

## 2.2 Escorias

Los residuos generados en la industria siderúrgica dependen tanto de las técnicas y procedimiento empleados, como del tipo de producto que se fabrica, hierro, acero al carbono, fundiciones, etc. En función de estos dos parámetros se obtienen residuos con diferentes características y propiedades.

Las formas más importantes de producción de los diferentes tipos de aceros se pueden observar en la Figura 2.6, centrándonos principalmente en el horno alto (BF) y en el horno cuchara (LF), ya que las escorias empleadas en esta tesis proceden de este tipo de hornos.

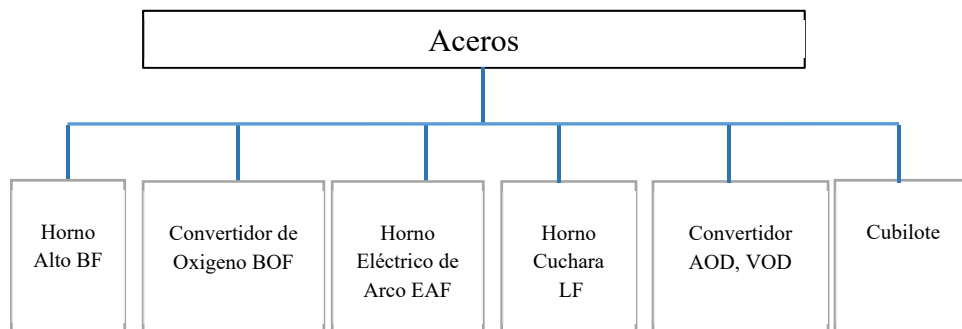


Figura 2. 6: Formas de producción en la Industria Siderúrgica

Entre los residuos que genera la industria siderúrgica, nos encontramos lo que se conoce como escoria siderúrgica, que aparece flotando en los caldos líquidos de las aleaciones férreas y que se convierte en sólidos inertes una vez enfriados. La escoria se forma en lo que se conoce como metalurgia secundaria o fase de afino, denominándose estas escorias blancas o LFS (Ladle Furnace Slag), cuando se produce en la metalurgia primaria u horno alto se denomina escorias de alto horno BFS (Blast Furnace Slag) [18].

Para la investigación de esta tesis doctoral, se han utilizado estos dos tipos de escorias, que son en las que nos centraremos a continuación.

### 2.2.1 Escorias de alto horno (Blast Furnace Slag)

En la planta de siderurgia integral o fábrica, donde se produce el acero a partir de hierro, la instalación fundamental para la producción de arrabio es el alto horno, siendo esta la materia prima para la producción de acero. El horno alto es un horno de cuba al que se le inyecta por la parte inferior normalmente CO, gas reductor, y por la parte superior materiales formados por minerales de hierro, coque y fundentes. Se obtienen dos productos finales, arrabio y escoria [19].

La escoria que se obtiene es un líquido a temperatura de entre 1350 y 1550°C que puede ser sometido a distintas técnicas de enfriamiento, pudiéndose obtener materiales con características de utilización claramente diferenciadas: escoria cristalizada, escoria vitrificada (granulada) y escoria dilatada o peletizada [20].

La caliza reacciona con materiales ricos en  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  asociados con el mineral o presentes en las cenizas del carbón, se emplea como fuente adicional de monóxido de carbono y como sustancia fundente. Este material se combina con la sílice presente en el mineral (que no se funde a las temperaturas del horno) para formar silicato de calcio, de menor punto de fusión. Sin la caliza se formaría silicato de hierro, con lo que se perdería hierro metálico.

Dependiendo de cómo sea el proceso de enfriamiento al que se someta la



escoria, se obtendrán materiales con características totalmente diferenciadas. Si se enfría lentamente, la escoria cristaliza dando lugar a un material que no posee características conglomerantes (**escoria cristalizada**), (Figura 2.7). Por el contrario, si se enfría lo suficientemente rápido por debajo de  $800^{\circ}\text{C}$ , se forman estructuras vítreas, sólidas cuyas moléculas no han tenido tiempo de orientarse al estado cristalino por la rapidez del enfriamiento, que son un cemento hidráulico en potencia. El enfriamiento se realiza rociando la escoria fundida con chorros de agua a alta presión. A este proceso se le llama **granulación**, porque la escoria se descompone en pequeñas partículas alveolares con aristas cortantes, generándose un material húmedo, donde la reacción química entre la escoria y el agua es lenta, viéndose reforzada por la presencia de hidróxido de calcio, álcalis y yeso, siendo esta de textura arenosa que una vez molido y secado, se denomina **escoria granulada** de alto horno, **GGBFS** (Ground Granulated Blast Furnace Slag) [21]. En la Figura 2.7, se muestra una imagen de este tipo de escoria.

Existe otro tratamiento de la escoria que consiste en dejar caer la escoria fundida sobre un tambor giratorio, regado con agua, que lanza la escoria al aire formando una pila al caer al suelo. A la escoria que se obtiene con este tratamiento se le conoce como **escoria peletizada** (Figura 2.7), en función de las características técnicas del equipo de peletización, los tamaños de las partículas y el grado de vitrificación variarán. Este proceso presenta mayores ventajas para la industria siderúrgica ya que se reduce la emisión de gases sulfurosos y se forma un producto más seco [22].



Figura 2. 7: Escorias de alto horno

### 2.2.1.1 Propiedades de la escoria granulada (GGBFS)

- **Propiedades físicas**

La estructura física de estas escorias se presenta como una arena 0/6 mm, con tamaño mínimo de 1 mm cuando se granula en cubeta. Pueden encontrarse porcentajes pequeños de tamaños inferiores a 80  $\mu\text{m}$ , aunque en el caso de escorias muy activas este porcentaje puede aumentar durante los procesos de manipulación. En fracciones superiores a 5 mm su caracterización se presenta como elementos inertes de color oscuro y de gran dureza, que no están vitrificados sino cristalizados.

Tienen una densidad aparente muy variable, entre 0,5 y 1,5  $\text{t/m}^3$  y un peso específico de 2,86 aproximadamente. Esta densidad está ligada a su actividad, de forma que cuanto la densidad es más baja más activa es la escoria y viceversa. El contenido de agua varía del 5 al 25% e incluso más para las escorias granuladas más activas.

- **Propiedades químicas**

Estas escorias tienen una composición química idéntica a las escorias cristalizadas, ya que se obtienen por enfriamiento brusco de la misma escoria líquida con agua a presión. Los iones no tienen tiempo de ordenarse según una red cristalina y se solidifican en estado vítreo. Conservan su calor de cristalización, por lo que tienen la característica de ser energéticamente fuertes y tienen una alta capacidad de hidraulicidad, que permiten formar, en contacto con el agua productos hidratados, por lo que son estables frente al agua.

La composición química de estas escorias, depende en gran medida del mineral de hierro, del coque y de los óxidos utilizados como material fundente.

A continuación, se muestra la Tabla 2.4, con los valores promedio de la composición de estas escorias.

Escorias GGBFS			
Óxidos	Concentración (%)	Óxidos	Concentración (%)
CaO	38-42	FeO	0.4-0.8
SiO <sub>2</sub>	32-37	TiO <sub>2</sub>	0.3-0.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10-14	MnO	0.2-0.6
MgO	7-9	I <sub>b</sub>	<1.2
S	<1	I <sub>bs</sub>	<1.3

Tabla 2. 4: Composición química promedio de la escorias GGBFS

### 2.2.2 Escoria de acería de Horno de Arco Eléctrico (Electric Arc furnace Slags-EAF Slags)

En las acerías de horno de arco eléctrico, para el proceso de fabricación del acero, se pueden distinguir dos etapas diferenciadas, a saber, una primera etapa denominada metalurgia primaria o fusión, donde es fundida la materia prima necesaria, normalmente chatarra de hierro dulce o acero, donde la energía térmica necesaria para la fusión proviene del arco eléctrico que se produce entre los electrodos del horno (Figura 2.8), formándose acero líquido y escorias, que aparecen en la superficie del líquido. Una segunda etapa que se conoce como metalurgia secundaria o afinado del baño fundido, que comienza en el horno eléctrico y finaliza en el horno cuchara (Figura 2.8), [23].



Figura 2. 8: Horno eléctrico de arco, Horno de cuchara.

A su vez, en la etapa de fusión, se puede distinguir la fase de oxidación del hierro contenido en la chatarra, donde se eliminan las impurezas de manganeso y silicio, produciéndose un aumento importante de temperatura del líquido fundido, 1600°C, reduciéndose así el consumo energético, y la fase de defosforación, etapa muy importante donde la presencia del fósforo en el líquido fundido produce la fragilidad del acero en frío y la formación de escoria espumante donde se acumulan todas las impurezas.

Al final de todo este proceso, es de donde se extraen lo que se conoce como **escorias negras u oxidantes**, Electric Arc Furnace Slag (EAFS). Presenta colores oscuros debido a los óxidos de hierro procedentes del proceso de oxidación, y tiene como componentes mayoritarios óxidos de sílice, alúmina y hierro, su aspecto es irregular, rugoso y de cantos puntiagudos [24].

La etapa de afino incluye la desoxidación, donde se eliminan los óxidos metálicos del baño, la desulfuración y la descarburación del acero. El líquido fundido procedente del horno eléctrico pasa al horno-cuchara, y allí, se cubre de una capa de escoria a la que se denomina **escoria blanca**, Ladle Furnace Slag (LFS). La escoria blanca permite la reducción de los óxidos metálicos presentes en el baño, durante la denominada fase de desoxidación, [25]. Paralelamente se realiza la desulfuración del líquido fundido, que se produce por simple contacto con la cal existente en la escoria blanca, [26].

En la Figura 2.9, se realiza una sencilla representación gráfica de la obtención de las distintas escorias en la fabricación de acero con hornos EAF-LF [27].



Figura 2. 9: Proceso de fabricación de acero con hornos de EAF-LF

Como ya se ha visto anteriormente, en la fase de afino es dónde se produce la diferenciación del tipo de acero que se fabrica, ya sea acero común o acero especial. Sin embargo, en la fabricación del acero inoxidable, ya desde el comienzo es distinta, que generalmente se realiza en atmósfera controlada de argón para evitar la oxidación del cromo.

En función de la diferente etapa donde nos encontremos, el producto obtenido se presenta de tres diferentes formas, sólida, líquida o gaseosa. La etapa líquida, formada por el líquido fundido, la etapa sólida, formada por la escoria, negra si procede de la fusión y blanca si procede del afino y por último la etapa gaseosa, formada por los gases de fusión y las partículas finas, polvo de acería.

Como ya se ha visto, durante este proceso de fabricación del acero, se generan diferentes tipos de residuos, por un lado, los residuos sólidos y por otro residuo gaseoso.

Los residuos sólidos generados son escorias negras y blancas, refractarios, procedentes de la rotura del refractario o de la reconstrucción y reparaciones del horno y restos de electrodos.

Los residuos gaseosos se depuran mediante sistemas de filtración de vía seca, dónde los gases depurados se devuelven a la atmósfera y las partículas que contenían, polvos de acería, se almacenan. El estudio de las escorias blancas LFS, es el centro de esta tesis doctoral.

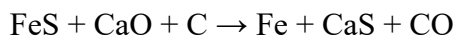
### 2.2.2.1 Escoria blanca, LFS

Se denomina escoria blanca (LFS) a la espuma, una vez enfriada, que se genera cuando la carga de acero líquido se vacía del horno eléctrico de arco al interior del horno de cuchara, después de la fase de afino. Este proceso se realiza en dos etapas, una primera denominada afino primario o afino ácido que se lleva a cabo en el horno EAFS o en el LFS, y una segunda que se realiza en el horno de cuchara, a la que se conoce como afino secundario o afino básico.

El proceso con afino ácido, se realiza con el soplado de oxígeno, defosforación y formación de la escoria.

En la segunda fase, se añade de nuevo materia prima, es decir, el caldo fundido procedente del arco eléctrico. Este caldo se vuelve a cubrir otra vez con escoria y se agita continuamente con un soplado de gas inerte. A esto se conoce como desulfuración del líquido fundido produciéndose en este punto la escoria blanca, mediante la combinación del calcio que entra en contacto con el líquido fundido y la cal existente en él [28]. Ello sucede ya que la densidad de las escorias es menor que la del caldo.

Esta fase es muy importante para la elaboración del acero ya que, se encuentra presencia de azufre, formando sulfuro de hierro (FeS), el cuál funde a 1.190 °C y origina, junto con el hierro eutéctico, un punto de fusión muy bajo. Estos dos compuestos solidifican, formando membranas que envuelven los cristales de hierro solidificados a temperaturas de 1.535 °C. Si el acero se produce a menos de esa temperatura es más frágil y aparecen numerosas grietas en el proceso. Y ya, por último, el proceso de desulfuración se produce al adicionar calcio al líquido, formándose la siguiente reacción:



Este proceso es más eficaz, cuanto más básica sea la escoria y menor contenido en hierro tenga, siendo esencial en el proceso asegurar la basicidad de la escoria. Ésta debe tener alrededor de un 70% de CaO-MgO, ya que la función que cumple el óxido de hierro es la de mantener la basicidad alta, y el MgO se encarga de la protección de las paredes del refractario[28]. Este compuesto no se puede encontrar en abundancia en la escoria, puesto que hay estudios en los que se le atribuye expansividad de la misma. Por otro lado estos dos compuestos no pueden coexistir en estado líquido porque tienen su punto de fusión entre 2.800 °C y 2.600 °C, respectivamente, mientras que la escoria alcanza su punto de fusión a 1.200 °C [29]. Por tanto, la escoria se satura por la cal y, por esta razón, obtenemos dos tipos de escoria en función de la saturación de la misma:

- Escoria blanca saturada en sílice
- Escoria blanca saturada en alúmina

Estos dos tipos de escoria tienen una composición parecida, no comportándose de diferente manera según el tratamiento que reciban en las acerías, donde la adición de sílice o alúmina durante la desulfuración originan diferentes compuestos. En las acerías españolas, lo normal es la obtención de escorias blancas saturadas en sílice.

Una vez terminado este proceso, la escoria incandescente se lleva a acopios, para el proceso de enfriamiento. Al principio llega como una masa hasta que, trascurrido un tiempo, se produce la pulverización de la misma.

- **Propiedades de las escorias blancas (LFS)**

Este material, ya en vertedero y una vez enfriada, se encuentra en forma de polvo. Esta cualidad se mantiene constante si permanece en un lugar seco y protegido de la temperatura ambiente. Si el enfriamiento al que es sometido se encuentra a la intemperie, se genera un material amorfo y quebradizo; por el contrario, se conservarán las propiedades polvorientas con un color grisáceo y suave al tacto en un enfriamiento lento. Para este

estudio son necesarias escorias finas, puesto que presentan mejores propiedades cementosas.

- **Propiedades químicas**

La composición química de las escorias (LFS) es distinta a las (EAFS), por su menor contenido en óxidos ferrosos. Esta composición, según su procedencia, también varía, en función del tipo de chatarra que utiliza. Por lo tanto, las características de los residuos generados también son diferentes [30].

Este tipo de escorias contiene cal libre y magnesio, pudiendo dar lugar a problemas, como expansión retardada en zonas estructurales y siendo por ello muy importante realizar un estudio exhaustivo de cada tipo de escoria y su reacción con el agua, puesto que es lo que más afecta a la estabilidad de volumen. Por tanto, son necesarias escorias cuyo grado básico sea inferior a dos, ya que las fases cristalinas que se forman tienen estabilidad volumétrica [31].

En general, los óxidos de aluminio y silicio son los que forman la escoria blanca, y suponen un 40% del peso total. El 60% el resto de compuestos, siendo en menor porcentaje los de magnesio, titanio, etc.

En el capítulo de materiales se estudia si este tipo de escorias se asemeja a alguna de las mencionadas anteriormente.

En la siguiente Tabla 2.4 se puede ver la composición y el porcentaje en el que se encuentran estos óxidos.

Óxidos	Composición (%)	Óxidos	Composición (%)
CaO	45 - 62	S	1.4 - 1.65
SiO <sub>2</sub>	17 - 20	FeO	0 - 0.95
MgO	4 - 17	MnO	0 - 1.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 - 10	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 - 3.6

Tabla 2. 5: Composición química escorias blancas (LFS)



## 2.3 Lechadas de cemento

Se puede definir la lechada de cemento como una suspensión, donde pequeñas partículas sólidas (cemento, bentonita o cal) se distribuyen en un medio de dispersión líquido (agua), que pueden llevar algún aditivo. Se utiliza generalmente en el mundo de la geotecnia, principalmente para inyecciones de terreno, cimientos y túneles, [32]. También se denominan lechadas a aquellas mezclas que incluyan la adición de polvo mineral o arena de tamaño inferior a dos milímetros, en cantidad, inferior en peso, a la total del cemento de la mezcla [33]. Para garantizar el funcionamiento y seguridad de las estructuras en construcción, también se utilizan las lechadas a base de cemento, así como en la mejora de las propiedades mecánicas de suelos o rocas.

La aparición del cemento Portland en la última parte del siglo XIX dio lugar a la generalización de este conglomerante en la albañilería y la construcción. Los diferentes usos de las lechadas requieren de ellas propiedades diferentes. Por ejemplo, la lechada de cemento es la mezcla de cemento sin arena con agua para conseguir un fluido semilíquido que tiene diferentes usos y aplicaciones en construcción. Si nos centramos en el campo de la albañilería se utilizan en rejuntado de pavimento de terrazo, colocación de pavimento gres, para rejuntado de pavimento cerámico, para impermeabilizar con hidrófugo, etc. Si nos centramos en la lechada aplicada en la geotecnia, que son las que se reflejan en esta tesis, aplicaciones en la ingeniería civil que van desde las tuberías de alcantarillado a nuevo túnel o eje de construcción, rellenar cavidades estrechas (grietas), fisuras de la roca o impregnar de suelos para control de las aguas subterráneas, anular relleno o aumentar soporte estructural de la geología.

Por otro lado, para la colocación de anclajes, bases de depósitos o bancadas de maquinaria la utilización de hormigón convencional puede traer numerosos problemas en la consecución de las prestaciones y resultados necesarios. Uno de los problemas que mayormente predomina es la retracción por la que el hormigón se contrae y pierde volumen. También

es necesario para este tipo de aplicación que el hormigón fluya por lo que se suele vibrar en exceso genera disgregación de los áridos y disminución de la resistencia.

Las lechadas son un material muy fluido, autonivelante que se utiliza para rellenar bases, anclajes y pequeños espacios. También se aplican en estructuras de hormigón postensado para el relleno de las cavidades de los cables [34]. Estas lechadas de cemento Portland se utilizan predominantemente para estabilizar el suelo y control de agua en proyectos civiles, como presas de tierra, diques, minas, túneles subterráneos, ejes verticales, estructuras por debajo de la tierra o también encapsulación de desechos. Este tipo de proyectos a gran escala a menudo requiere significativos volúmenes de lechada que se inyecta. En el material estudiado en esta tesis se centra en este tipo de lechadas, para estas aplicaciones, donde la técnica de utilización predominante es lo que se conoce como jet grouting utilizándose grandes silos situados en las instalaciones para su puesta en marcha [35].

La inyección de un terreno implica la introducción en el mismo de una mezcla fluida que posteriormente fragua y endurece, para reducir su grado de permeabilidad y/o mejorar sus condiciones mecánicas. En el proceso se controla indirectamente la colocación a distancia de materiales bombeables mediante el ajuste de sus propiedades reológicas y de sus parámetros de colocación, presión, volumen, caudal.

### **2.3.1 Tipos de inyección con lechadas**

#### **2.3.1.1 Inyección de partículas (Impregnación):**

Las inyecciones de impregnación consisten en la introducción de la mezcla en las juntas, en las fracturas de la roca o los poros del suelo, sin desplazamiento del terreno. Su objetivo principal es reducir la permeabilidad del mismo, y mejorar su resistencia y su rigidez. Se utilizan para aumentar la capacidad portante, en recalces, para reducir el potencial de licuefacción y para excavaciones bajo el nivel freático.

En este tipo de inyecciones los huecos susceptibles de impregnación van siendo cada vez de menor diámetro. El tratamiento por impregnación exige, por tanto, el empleo de mezclas cada vez más penetrantes, destinadas estas últimas a producir la obturación de oquedades mayores [36]. La inyección debe ser suficiente para impregnar el terreno, sin romperlo.

### 2.3.1.2 Jet Grouting:

El jet grouting es la sustitución parcial y/o mezclado del terreno por medio de la inyección de lechada a muy alta velocidad a través de pequeñas toberas laterales mientras se sube y se rota, con velocidad controlada, el varillaje de perforación [37]. De esta forma se crean de manera controlada columnas de suelo-cemento.

Los efectos sobre el terreno y las características del jet-grouting son los siguientes:

- ✓ Se produce una mejora del terreno natural entre columnas, debido a la compactación provocada por la expansión del terreno en los alrededores del taladro como consecuencia de la inyección de mezcla a alta presión. Se ha comprobado haciendo ensayos de reconocimiento “in situ”, antes y después del tratamiento. Esta mejora se ha observado con taladros realizados con separación de 2 metros
- ✓ No altera las presiones intersticiales del terreno fuera de las columnas tratadas.
- ✓ No afecta a las condiciones de estabilidad de las estructuras existentes.
- ✓ Tiene una gran versatilidad, lo que permite soluciones de pilotaje, muro-pantalla o anclajes de arriostramiento, sin dañar a estructuras próximas. Puede llevarse a cabo prácticamente en cualquier tipo de terreno y a través de obstáculos artificiales (galerías, cimientos, forjados, etc.).

La capacidad portante del terreno tratado debe considerarse como una

suma de las columnas tratadas y del terreno natural mejorado situado entre ellas. La carga por columna suele tomarse de 200 a 1000 kN y la presión admisible bajo cimientos de 0,5 MPa a 1,5 MPa. Aunque se han desarrollado numerosas variantes del método de jet-grouting [38,39], en la práctica habitual en España se contemplan tres tipos de tratamientos mediante este procedimiento [40]:

- Tipo 1: Denominado simple, mono jet o fluido única, en donde la propia inyección de lechada de cemento produce por una parte la disgregación o el desplazamiento del terreno y, por otra su mezclado con el mismo.
- Tipo 2: Denominado Jet de doble fluido. Se presenta con dos variantes:

*Variante 2A AGUA+LECHADA.* El tratamiento se realiza a través de dos filas de toberas. La disgregación del terreno se realiza con ayuda de agua a alta presión por la fila superior de toberas y la inyección de relleno de lechada de cemento se realiza a menor presión en las toberas inferiores.

*Variante 2B AIRE+LECHADA.* Los chorros son concéntricos, potenciando el aire la acción de rotura del terreno y el mezclado de la lechada de cemento, además de favorecer la evacuación de detritus.

- Tipo 3: Denominado Jet-grouting de triple fluido o triple-jet, consiste en envolver con aire comprimido el chorro de agua a alta presión del tipo 2, que se inyecta por las toberas superiores para romper el terreno y, posteriormente rellenarlo con lechada de cemento inyectada por las toberas inferiores.

### 2.3.1.3 Inyecciones de Compactación

Es un método de inyección con desplazamiento del terreno en el que se trata de introducir en el suelo, sin impregnarlo ni fracturarlo, una mezcla de inyección que tenga un ángulo de rozamiento elevado. También se denominan inyecciones de desplazamiento o de baja movilidad. Se introducen mezclas y masas muy viscosas, espesas y gruesas que provocan

en primer lugar, la compresión del terreno flojo y, después, su desplazamiento controlado.

Las inyecciones de compactación son especialmente adecuadas para suelos no cohesivos de compacidad floja. Se emplea también en suelos cohesivos para introducir elementos de mayor resistencia y capacidad portante.

Las aplicaciones de esta técnica son múltiples: Corregir asientos diferenciales, aumento de la capacidad portante bajo estructuras, alternativa a la cimentación, pretratamiento antes del jet-grouting, aumento de la capacidad portante en cimentaciones pilotadas, reducción del potencial de licuefacción, inyecciones de compensación en la excavación de túneles y rellenos de grandes cavidades en terrenos kársticos.

Esta tecnología es efectiva en suelos predominante granulares sueltos, saturados y no saturados, y en suelos de granos finos blandos no saturados.

#### **2.3.1.4 Inyecciones de Compensación**

La técnica de las inyecciones de hidrofracturación consiste en aplicar a través de tubos manguito una lechada de cemento a una presión superior a la resistencia del terreno más su presión de confinamiento. De forma deliberada se propagan nuevas fracturas en el terreno por las que penetra la lechada quedando el terreno reforzado por láminas de inyección.

En suelo homogéneo con superficie horizontal, se forman en primer lugar fracturas verticales (perpendiculares a la tensión principal menor), aunque depende en gran medida de la anisotropía del suelo. Debido al aumento de la compactación lateral por el relleno de las fracturas verticales se desarrollan a continuación fracturas horizontales, obteniéndose un suelo reforzado con láminas de inyección endurecidas, con el suelo compactado entre láminas.

Las aplicaciones particulares de este tipo de inyección son la reducción de

asientos, el aumento de la capacidad portante y de la estabilidad al deslizamiento.

Estas aplicaciones se han concretado en dos tipos de inyección cuya base es la fracturación: inyecciones de compensación e inyecciones armadas.

Las inyecciones de compensación se utilizan para proteger los edificios de asientos producidos por la excavación de túneles y por las grandes excavaciones para sótanos. Constan, en general, de las siguientes fases: preparación del terreno e inyecciones previas, sobreelevación uniforme, compensación concurrente (durante la excavación), compensación observaciones (después de la excavación).

### **2.3.2 Características principales de las lechadas de cemento**

Las lechadas de cemento poseen la capacidad de realizar una transmisión uniforme de los esfuerzos entra la estructura apoyada y la cimentación o anclajes de la misma, haciendo que funcione todo como un conjunto.

Características principales que debe tener:

- Muy poca retracción.
- Gran fluidez.
- Expansión controlada y gran adherencia.
- Alta resistencia mecánica.
- Termoresistente.
- Muy baja inclusión de aire o burbujas.
- Resistencia a ambientes agresivos.
- Fácil aplicación y puesta en servicio.
- Desarrollo de alta resistencia a corto plazo.

Una correcta planificación es esencial para una buena aplicación. Se debe respetar estrictamente la adición de agua recomendada por el fabricante y calcular detalladamente el consumo de material previsto incluyendo el desperdicio asegurando de contar con todo el material necesario para evitar situaciones de corte de flujo en el momento del vertido del material.

Para la fabricación de la lechada de cemento es parámetro fundamental la relación agua/cemento que se utilice, puesto que el producto final tendrá diferentes usos. En la Figura 2.10, se muestra de forma gráfica la relación agua/cemento recomendada en función del tipo de aplicación.

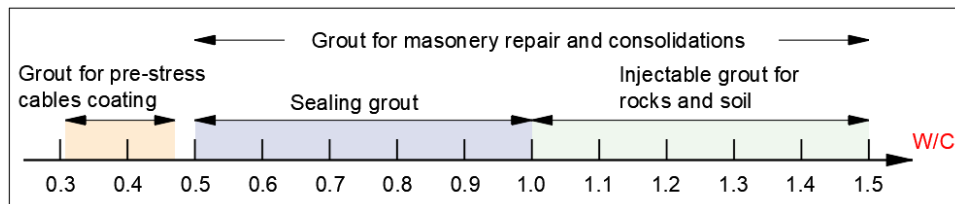


Figura 2. 10: Relación agua/cemento dependiendo de la aplicación

## 2.4 Bibliografía

1. Gomà i Ginesta, F. *El Cemento Portland y otros aglomerantes :fundamentos para la interpretación de sus comportamientos en obra*; Editores Técnicos Asociados, 1979; ISBN 8471461927.
2. Milenium Definición de Software, Qué es, Significado y Concepto Available online: <https://definicion.de/cemento/> (accessed on Dec 4, 2018).
3. Martinez, A. R. Estudio del sector cementero a nivel mundial y nacional , con particularización de una empresa cementera situada en la Comunidad Valenciana, 2014.
4. Presidencia, M. de la Instrucción para la recepción de cementos (RC-08). **2016**, 70, doi:BOE-A-2016-6167.
5. European Comittee for standardization EN 197-1:2011Cement-Part1:Composition, specifications and conformity criteria for commons cements.
6. European Comittee for standardization EN 197-4:2005Cement - Part 4: Composition, specifications and conformity criteria for low early strength blastfurnace cements 2005.

7. European Committee for standardization EN- 14216:2105Cement - Composition, specifications and conformity criteria for very low heat special cements.
8. European Committee for standardization EN 14647:2006Calcium aluminate cement - Composition, specifications and conformity criteria.
9. European Committee for standardization EN 413-1:2011Masonry cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria. *Office* 2013, 46.
10. Cemento Aluminoso | Construpedia, enciclopedia construcción Available online: [https://www.construmatica.com/construpedia/Cemento\\_Aluminoso](https://www.construmatica.com/construpedia/Cemento_Aluminoso) (accessed on Jan 24, 2019).
11. Luis Castillo, A. Evaluación de la Arcilla Calcina de pontezuela como aditivo extendedor en lechadas de cemento Portland. **2015**.
12. Rixom, M. R.; Mailvaganam, N. P. (Noel P. . *Chemical admixtures for concrete*; Routledge, 1999; ISBN 9780419225201.
13. Taylor, H. F. W. (Harry F. W. . *Cement chemistry*; T. Telford, 1997; ISBN 0727725920.
14. Taylor, H. F. W. (Harry F. W. . *Cement chemistry*; T. Telford, 1998; Vol. 20; ISBN 0-7277-3945-X.
15. European Committee for standardization EN 196-2:2014Method of testing cement - Part 2: Chemical analysis of cement 2011.
16. La Revista Ingenieria de Construcccion - Google Libros.
17. Bensted, J. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*; Elsevier Butterworth- Heinemann, 1998; ISBN 9780750662567.
18. Fomento, M. de; CEDEX Ficha técnica escorias de horno de arco eléctrico. *Cedex* **2011**, 2.3, 1–19.
19. Gómez2011, A. M. M. J. Utilización de escorias como sustitutos de áridos.



20. Jose Luis Pastor Navarro Características de durabilidad de las lechadas de cemento para su empleo en micropilotes en terrenos agresivos. Tesis Doctoral. 2016.
21. National Slag Association Blast furnace slag 2009, 2009.
22. Ficha técnica clave: 2.1 Mes: Diciembre. Escoria granulada, escoria cristalizada 2011.
23. Palacios JM, Srana JL, L. La Fabricación del Acero (2002) ISBN 84-605-7290-0; Ed. UNESID.
24. Barrio, M. I. P. Análisis del comportamiento a corrosión de armaduras embebidas en probetas de mortero, con sustitución parcial de áridos y cementos por escorias blancas de horno cuchara. Tesis doctoral. 2012.
25. Fomento, M.; Rural, M. medio ambiente y CEDEX Ficha técnica escorias de horno de arco eléctrico. CEDEX 2011, 2.3, 1–19.
26. Kjellsen, K. O.; Detwiler, R. J.; Gjörv, O. E. Backscattered electron imaging of cement pastes hydrated at different temperatures. *Cem. Concr. Res.* **1990**, *20*, 308–311, doi:10.1016/0008-8846(90)90085-C.
27. Rodríguez, O. Valorización de un residuo industrial procedente de la industria papelera como material puzolánico, Universidad Autónoma de Madrid, 2007.
28. Romea, C. El hormigón: breve reseña histórica de un material milenario. In *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación*; OmniaScience, 2014; Vol. 0, pp. 1–18.
29. Simonnet, C. Hormigón, historia de un material; Nerea, 2009; ISBN 978-84-96431-10-2.
30. Vitruvio Polión M.L. Compendio de los diez libros de la Arquitectura. Literatura Obras Maestras.; 2010.
31. Heyman, J.; Lopez Manzanares, G.M.; Huerta Fernández, S. La

- ciencia de las estructuras; Instituto Juan de Herrera, 2001; ISBN 8495365987.
32. Aldundia, B. F.; Lanak, S. H.; Bizkaia, D. F. de *Pliego de prescripciones técnicas particulares*; 1998;
  33. European Committee for standardization EN 14199: 2006 Execution of special geotechnical works - Micropiles.
  34. ¿Que es un grout o mortero fluido para anclajes? – Cymper Available online: <https://www.cymper.com/blog/que-es-un-grout-o-mortero-fluido-para-anclajes/> (accessed on Feb 18, 2019).
  35. Cement Grout vs. Chemical Grout: Which One to Use, When, and Why Available online: <https://tunnelingonline.com/cement-grout-vs-chemical-grout-one-use/> (accessed on Feb 18, 2019).
  36. Cuellar, V. Inyecciones por fracturación e inyecciones de impregnación”. Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS 4a Sesión: Mejora del terreno mediante Inyecciones y Jet Grouting, Madrid.2004.
  37. Armijo, G. “Jet Grouting”. Curso sobre cimentaciones y mejora del terreno DRAGADOS-GEOCISA. 2008.
  38. Huybrechts, N.; Denies, N. General Report of TC 211- ground improvement. *18th Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng. Innov. Geotech. Paris, 2013.* **2013**, 2013.
  39. Celma, J. J. “Análisis de los Factores que intervienen en la Técnica del Jet Grouting”. Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS 4a Sesión: Mejora del terreno mediante Inyecciones y Jet Grouting, Madrid.2004.
  40. Montalván, A. L. D. *Linguistic Insights*. 2016, pp. 7–9.



## **CAPÍTULO 3**

### **Análisis experimental. Caracterización de los materiales y dosificación de las lechadas**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## ÍNDICE

3.1 Introducción .....	69
3.2 Caracterización de los materiales .....	70
3.2.1 Cemento .....	70
3.2.2 Escorias .....	72
3.2.2.1 Caracterización de escorias de alto horno (GGBFS) .....	72
3.2.2.2 Caracterización de escorias de horno de arco eléctrico (LFS1) .....	75
3.2.2.3 Caracterización de escorias de horno de arco eléctrico (LFS2) .....	78
3.3 Dosificación, amasado y preparación de las probetas .....	79
3.3.1 Dosificación .....	80
3.3.2 Amasado y preparación de probetas .....	80
3.4 Bibliografía .....	84

## TABLAS

<i>Tabla 3. 1: Composición química del cemento CEM I 42,5 R y 52,5 R .....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 3. 2: Caracterización química de la escoria GGBFS .....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 3. 3: Composición química de la escoria LFS1 .....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 3. 4: Composición química de la escoria LFS2 .....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 3. 5: Amasadas y probetas realizadas .....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 3. 6: Amasadas y Probetas realizadas .....</i>	<i>82</i>

## FIGURAS

<i>Figura 3. 1: Clinker .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3. 2: Curva de distribución granulométrica del cemento CEM I .....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 3. 3: Escoria GGBFS granulada y escoria molida .....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 3. 4: Curva de distribución granulométrica escorias GGBFS .....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 3. 5: Muestra escoria LFS1 sin tamizar .....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 3. 6: Muestra escoria LFS1 tamizada .....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 3. 7: Muestra escoria LFS2 antes y después de tamizar .....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 3. 8: Molde prismático de acero .....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 3. 9: Mezclador de laboratorio para lechadas cementosas .....</i>	<i>82</i>

<i>Figura 3. 10: Preparación de moldes y molde lleno .....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 3. 11: Identificación de probetas .....</i>	<i>83</i>

### 3.1 Introducción

En este capítulo, se exponen los diferentes materiales empleados en las fases en que se ha dividido la investigación, y que formarán parte de la dosificación de las diferentes probetas de las distintas lechadas elaboradas. Los aspectos relacionados con la preparación de las muestras estudiadas se comentan a continuación.

El material utilizado es:

- Cemento  
CEM I 42,5  
CEM I 52,5 R.

En el capítulo anterior, se han descrito los principales usos y aplicaciones de los mismos. Se optó por estos cementos para evitar un posible enmascaramiento de los resultados obtenidos, ya que cualquier otro que tuviera algún tipo de adición podría hacerlo.

- Escorias

Escorias de alto horno (GGBFS)

Escorias blancas de horno de arco eléctrico (LFS), Se utilizarán dos tipos de escorias de diferentes procedencias, ambas acopiadas en vertederos en la propia fábrica. A estas escorias se denominarán LFS1 y LFS2.

- Agua

De consumo doméstico, limpia, sin impurezas para no producir alteraciones en la hidratación de la lechada, ni afectar a las propiedades mecánicas de las mismas

- Aditivos

No se ha utilizado aditivo en las lechadas fabricadas para no alterar las propiedades de las mismas y así valorar y cuantificar el efecto de las escorias sobre ellas.



## 3.2 Caracterización de los materiales

### 3.2.1 Cemento

En la actualidad, al cemento formado por material calcáreo y arcilla se le denomina cemento hidráulico. Entre ellos el más conocido es el cemento de Pórtland o cemento Pórtland, cuyo color grisáceo recuerda a la tonalidad de las piedras que se obtienen de las canteras de la isla de Pórtland (Inglaterra) [1]. Desde que en 1824, Joseph Aspdin, patentara estos cementos, este material ha ido ganando protagonismo en la ingeniería civil hasta haberse convertido en uno de los materiales industrializados de mayor consumo en el sector. Por ello, el cemento es estudio de investigación en el campo de la elaboración de morteros, lechadas y hormigones. Esta tesis pretende modificar o realizar sustituciones de materiales, con el fin de llegar a minimizar el impacto medioambiental que se causa en su elaboración.

El Cemento Portland, CEM I, compuesto por un 95-100% de Clinker y un 0-5% de componentes minoritarios, de clase resistente 42,5 , y 52,5 R, se obtiene mediante la pulverización del Clinker, Figura 3.1, cuya composición principal es de silicatos de calcio.



Figura 3. 1: Clinker

El tamaño de partícula que presentan estos cementos varía entre 0,4-38  $\mu\text{m}$ , siendo entorno a 20  $\mu\text{m}$  los tamaños de presencia máxima, en esta

distribución prácticamente unimodal, como se refleja en la curva de distribución granulométrica de estas escorias, Figura 3.2 [2].

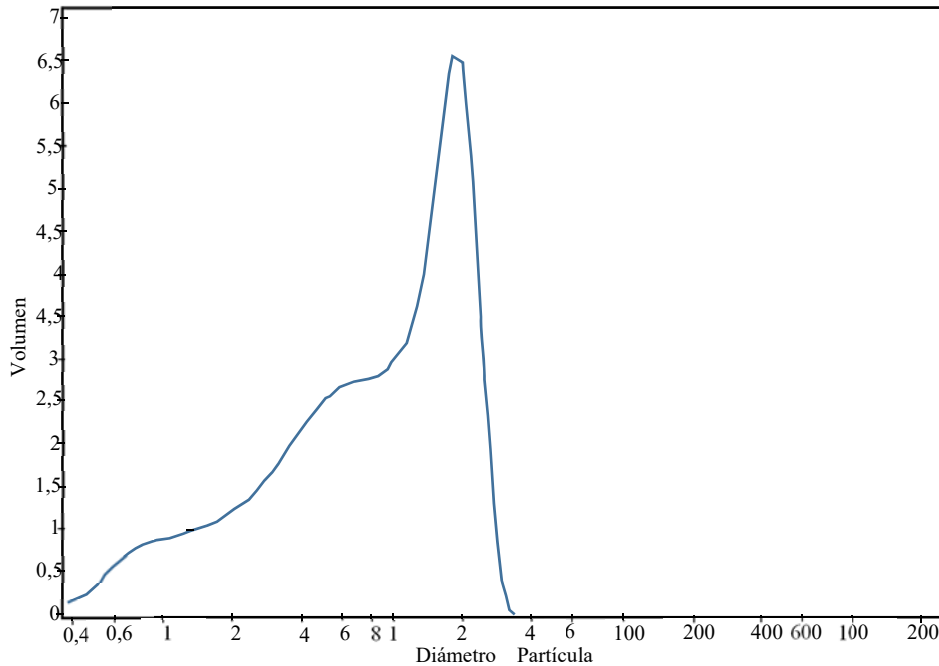


Figura 3. 2: Curva de distribución granulométrica del cemento CEM I

Dentro de la caracterización física del material, también se indica la densidad media del cemento CEM I que es aproximadamente de  $3,134 \text{ g/cm}^3$  y la superficie específica media  $> 2800 \text{ cm}^2/\text{g}$ [2].

Las características químicas que presentan son conocidas por las numerosas tablas de las diferentes cementeras y en numerosas investigaciones acerca del cemento [3,4]. A continuación se reflejan las características químicas del cemento CEM I 42,5 y CEM I 52,5 R (Alta resistencia), Tabla 3.1.

Cemento CEM I 42,5 y CEM I 52,5 R	
Óxidos	Composición (%)
CaO	63,56
SiO <sub>2</sub>	19,3
SO <sub>3</sub>	2,91
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,46
MgO	0,86
K <sub>2</sub> O	0,8
Na <sub>2</sub> O	0,13
Otros (ZnO, MnO, ZrO <sub>2</sub> , etc..)	3,41

Tabla 3. 1: Composición química del cemento CEM I 42,5 R y 52,5 R

### 3.2.2 Escorias

#### 3.2.2.1 Caracterización de escorias de alto horno (GGBFS)

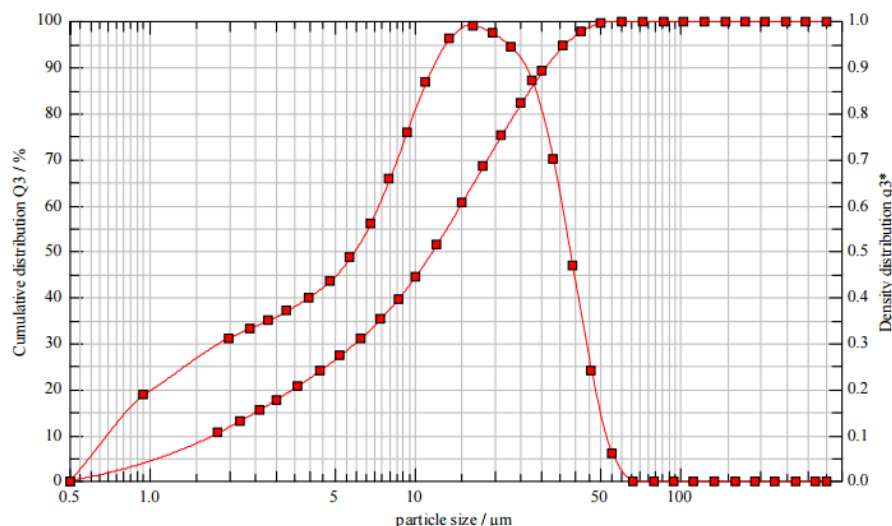
En este tipo de escorias la caliza reacciona con materiales ricos en SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> asociados con el mineral o presentes en las cenizas del carbón. Si se enfría lentamente, la escoria cristaliza dando lugar a un material que no posee características conglomerantes. Por el contrario, si se enfría lo suficientemente rápido, se forman unas estructuras vítreas que son un cemento hidráulico en potencia. El enfriamiento normalmente se realiza rociando la escoria fundida con chorros de agua a alta presión. Este proceso produce un material húmedo, de textura arenosa que una vez molido y secado, se denomina escoria granulada de alto horno.

La muestra original es una arena 0/3, con un alto contenido de humedad (entorno 8-10 %). Esta escoria se seca en la fábrica y se muele en molinos verticales de rodillos especiales que aprovechan la humedad para favorecer la molienda. Este proceso también se lleva a cabo en el clásico molino de bolas de cemento, pudiendo obtener una finura semejante. Figura 3.3.



*Figura 3. 3: Escoria GGBFS granulada y escoria molida*

El tamaño de partícula que presenta esta escoria varía entre 0,5-60  $\mu\text{m}$ , siendo entorno a 20  $\mu\text{m}$  los tamaños de presencia máxima, esta distribución es prácticamente unimodal, como se refleja en la curva de distribución granulométrica de estas escorias, Figura 3.4.



$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$	$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$	$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$	$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$
1,80	10,38	7,40	35,22	30,00	89,04	122,00	100,00
2,20	13,08	8,60	39,50	36,00	94,58	146,00	100,00
2,60	15,49	10,00	44,47	42,00	97,71	174,00	100,00
3,00	17,65	12,00	51,33	50,00	99,53	206,00	100,00
3,60	20,58	15,00	60,65	60,00	100,00	246,00	100,00
4,40	24,05	18,00	68,49	72,00	100,00	294,00	100,00
5,20	27,21	21,00	75,01	86,00	100,00	350,00	100,00
6,20	30,91	25,00	82,15	102,00	100,00		

Figura 3. 4: Curva de distribución granulométrica escorias GGBFS

La densidad de esta escoria es aproximadamente de  $2,95 \text{ g/cm}^3$  y la superficie específica entre  $4500\text{-}4700 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

La composición química, expresada como óxidos, se obtienen mediante fluorescencia de Rayos X (FRX) para determinar sus componentes principales, así como otros componentes secundarios cuyos contenidos se encuentran limitados.

Estos ensayos se han realizado en los laboratorios de la Universidad de Cádiz. El análisis se realizó con la muestra seca (20 gramos).

La tabla 3.2 presenta la caracterización química de dicha escoria.

Escorias GGBFS			
Óxidos	Composición (%)	Óxidos	Composición (%)
CaO	47,14	MnO	0,419
SiO <sub>2</sub>	32,3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,7	SrO	0,115
MgO	7,64	Na <sub>2</sub> O	0,08
SO <sub>3</sub>	1,52	ZrO <sub>2</sub>	0,0386
TiO <sub>2</sub>	0,699	NiO	0,035
K <sub>2</sub> O	0,448	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,011
TOTAL 101,4356			

Tabla 3. 2: Caracterización química de la escoria GGBFS

En la composición química de la escoria de alto horno GGBFS, se observa que los elementos en mayor proporción son el óxido de calcio y el óxido de silicio, conformando el 75% de la composición, y llegando al 90% de la estructura mineralógica una vez hidratados. También se encuentran, el óxido de aluminio, azufre, magnesio y sosa, esta composición coincide con las de los valores de la tabla 2.4 de las propiedades químicas generales de la escoria de alto horno, en el capítulo 2.

Los materiales puzolánicos con alto contenido en SiO<sub>2</sub> son capaces de generar tobermorita (hidrosilicatos de calcio (C-S-H)), mediante la reacción con la portlandita (compuesto de hidratación mineral del hormigón) en materiales cementosos, lo que aporta resistencia adicional a estas mezclas [5,6].

### 3.2.2.2 Caracterización de escorias de horno de arco eléctrico (LFS1)

La segunda escoria, es de horno de arco eléctrico denominada LFS1, proviene de acerías en la que la etapa metalúrgica es secundaria, generada por la fundición y laminación de aceros en caliente.

Esta escoria es un material mayoritariamente compuesto por tres tamaños, grava, arena y polvo. Se extrae tras el proceso de afino en caliente, y se transporta en vehículos especiales a una explanada donde se enfría mediante aspersores, pulverizándoles agua.

Las partículas de mayor tamaño son fragmentos de baja esfericidad y elevada irregularidad. Los tamaños de las partículas asociadas a polvo y arena son más redondeadas y tienen una superficie rugosa y una estructura cristalina. Esta variación de granulometría se debe a que la alúmina en el proceso de producción se satura al hidratarse la escoria disgregándose de la cal libre pero cuando vuelve la hidratación los aluminatos cálcicos que están presentes en ella de forma abundante, se agrupan formando granos de los diferentes tamaños, se observa en la Figura 3.5.



Figura 3. 5: Muestra escoria LFSI sin tamizar

Para llevar a cabo las probetas elaboradas con estas escorias se tamizan en el laboratorio, haciéndolas pasar por un tamiz de 63  $\mu\text{m}$ . La fracción que se obtiene después de pasar por el tamiz fue aproximadamente del 23% del total de escorias que se procesó. El aspecto de esta escoria después de ser tamizada es muy parecida al cemento CEM I, prácticamente de la misma tonalidad y textura, como se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3. 6: Muestra escoria LFS1 tamizada

La densidad de estas escorias es aproximadamente de  $2,65 \text{ g/cm}^3$  y la superficie específica entre  $2000\text{-}2500 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

La caracterización química de las escorias LFS1 se obtienen mediante fluorescencia de Rayos X (FRX), dando como óxidos principales los que se muestran en la Tabla 3.3.

Escorias LFS1			
Óxidos	Composición (%)	Óxidos	Composición (%)
CaO	55,18	SrO	0,256
MgO	16,9	ZnO	0,178
SiO <sub>2</sub>	13,7	BaO	0,088
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,1	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,074
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,57	NiO	0,061
SO <sub>3</sub>	1,28	Cl	0,056
MnO	1,25	K <sub>2</sub> O	0,04
TiO <sub>2</sub>	0,497	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,024
ZrO <sub>2</sub>	0,495	CuO	0,018
Total 100,767			

Tabla 3. 3: Composición química de la escoria LFS1



En la composición química de esta escoria, al contrario que en la anterior, existe mayoritariamente óxido de calcio, llegando hasta aproximadamente el 56% del total. Si observamos el porcentaje del dióxido de silicio, se obtiene un 13,7%, descendiendo el porcentaje hasta aproximadamente la mitad.

### 3.2.2.3 Caracterización de escorias de horno de arco eléctrico (LFS2)

Una segunda escoria de horno de arco eléctrico, denominada LFS2, proveniente de otra factoría cuya composición es diferente a la vista anteriormente.

Estas escorias llegan al laboratorio de manera fosilizada, haciéndose indispensable tamizarlas ( $63\ \mu$ ) al igual que se hizo con las LFS1. Deben tener esta finura, ya que su uso será la sustitución del cemento. Una vez tamizada, su aspecto es prácticamente igual que la escoria LFS1, textura suave y color grisáceo, Figura 3.7.



Figura 3. 7: Muestra escoria LFS2 antes y después de tamizar

El porcentaje de fracción que se obtuvo de esta escoria después de tamizarla apenas alcanzó el 15%, porcentaje más pequeño aún que el

obtenido en las escorias LFS1. Para valorizar estas escorias sería preciso un proceso de triturado, ya que en el estado que llegan es inviable su utilización.

Al igual que la escoria LFS1 la densidad es aproximadamente de 2,65 g/cm<sup>3</sup> y la superficie específica entre 2000-2500 cm<sup>2</sup>/g.

Para la caracterización química, se estudia su composición, mediante fluorescencia de Rayos X (FRX), Tabla 3.4.

Escorias LFS2			
Óxidos	Composición (%)	Fórmula	Composición (%)
CaO	54,9	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11
SiO <sub>2</sub>	18,8	ZnO	0,0489
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,5	SrO	0,04
MgO	6,99	NiO	0,035
SO <sub>3</sub>	3,05	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,34	Cl	0,026
TiO <sub>2</sub>	0,458	K <sub>2</sub> O	0,025
MnO	0,417	ZrO <sub>2</sub>	0,0191
BaO	0,13	CuO	0,014
Total 99,933			

Tabla 3. 4: Composición química de la escoria LFS2

La composición química de estas escorias es similar a las LFS1, tienen un alto contenido de óxido de calcio y bajo contenido en dióxido de silicio con respecto a las escorias GGBFS.

### 3.3 Dosificación, amasado y preparación de las probetas

Siguiendo la investigación el siguiente punto es definir la dosificación y proceso de elaboración de probetas de lechadas que se desarrollaran durante la campaña de ensayos, para su estudio en las diferentes edades establecidas.

### 3.3.1 Dosificación

Para la obtención de la dosificación se tiene en cuenta las inyecciones en grandes volúmenes como sería jet-grouting e inyecciones en presas, se centra la investigación en la relación agua/cemento que se va a utilizar, ya que las lechadas que se fabriquen tienen que ser fácilmente bombeables.

Se han utilizado las siguientes dosificaciones:

Por un lado, se han realizado mezclas con relación agua/cemento 1/1, con CEM I 42,5, y sustituciones de escoria GGBFS, LFS1 y LFS2 del 30, 40 y 50%.

Por otro lado, se han realizado mezclas con sustitución únicamente por escorias GGBFS, relación agua/cemento (1/1) y cemento CEM I 42,5 y CEM I 52,5 R con un porcentaje de sustitución del 50, 70 y 90%. A su vez mezclas con relación agua/cemento 0,67/1, con cemento CEM I 42,5 y 50, 70 y 90% y con cemento CEM I 52,5R y 50, 70 y 90% de sustitución.

### 3.3.2 Amasado y preparación de probetas

Se preparan tres amasadas para cada uno de los diferentes porcentajes de sustitución (30, 40 y 50), y relación agua/cemento 1/1 siguiendo las indicaciones de la norma EN 196-1 [7]. Los ensayos establecidos, fueron a 7, 28 y 90 días, obteniéndose 3 probetas para cada una de las roturas a flexión y seis para la rotura a compresión. En la Tabla 3.5, se reflejan estas amasadas y probetas.

Amasadas y Probetas (1ª Fase)								
			Roturas a Flexión			Rotura a Compresión		
	Amasadas	Probetas	7 días	28 días	90 días	7 días	28 días	90 días
<b>GGBFS</b>	3	9	3	3	3	6	6	6
<b>LFS1</b>	3	9	3	3	3	6	6	6
<b>LFS2</b>	3	9	3	3	3	6	6	6

Tabla 3. 5: Amasadas y probetas realizadas

Se prepararon probetas prismáticas de dimensiones 4 cm x 4 cm x 16 cm, según lo indicado en la norma EN 196-1 [7]. En este caso los moldes son de acero con tres compartimentos horizontales, realizándose simultáneamente tres probetas prismáticas, como se puede observar en la Figura 3.8.



*Figura 3. 8: Molde prismático de acero*

En la segunda parte de la investigación, se preparan seis amasadas para cada uno de los diferentes porcentajes de sustitución, y cada una de las relaciones agua/cemento 1/1 y 0,67/1, siguiendo las indicaciones de la norma EN 196-1 [7]. Para las roturas a flexión y compresión se designan, 2, 4, 7, 14, 28 y 90 días, realizando 3 probetas para cada una de las roturas a flexión y seis para la rotura a compresión, en cada dosificación, como se puede observar en la Tabla 3.6.

Amasadas y Probetas (2ª Fase)														
			Roturas a Flexión						Roturas a Compresión					
			Días						Días					
	Amasadas	Probetas	2	4	7	14	28	90	2	4	7	14	28	90
A	6	18	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	6
B	6	18	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	6
C	6	18	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	6
D	6	18	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	6

Tabla 3. 6: Amasadas y Probetas realizadas

El amasado se efectuó con una batidora eléctrica de construcción robusta, con dos velocidades de rotación, con paleta mezcladora con sistema de anclaje según la norma EN-196-1 [7], como se puede observar en la Figura 3.9. Una vez pesados los componentes de la lechada por la tolva dispensadora, el cemento Portland se incorpora al recipiente de mezcla con la escoria donde se mezcla durante 90 segundos, luego se agrega el agua y nuevamente se mezcla durante 180 segundos.



Figura 3. 9: Mezclador de laboratorio para lechadas cementosas

Una vez terminado el proceso se vierte la mezcla en el molde en tres capas, previamente impregnados de desencoformante, seguidamente se compacta manualmente con unos golpecitos con una varilla de vidrio, para ir cosiendo una capa con otra y obtener una buena compactación del material. Una vez están llenas las probetas, se enrasan con una llana, nivelando cuidadosamente la superficie, Figura 3.10.



Figura 3. 10: Preparación de moldes y molde lleno

Las probetas se mantienen en el molde durante 24 horas para que fragüen en las mismas condiciones de humedad y temperatura hasta su desmoldado. Por último, y una vez transcurrido el tiempo de fraguado se desmoldan e identifican, Figura 3.11.



Figura 3. 11: Identificación de probetas

El curado de las probetas se ha realizado mediante inmersión en agua, utilizando un baño de curado donde se mantiene el agua a una temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ .

### 3.4 Bibliografía

1. Milenium Definición de Software, Qué es, Significado y Concepto Available online: <https://definicion.de/cemento/> (accessed on Dec 4, 2018).
2. Vazquez, T. H. Estudio del efecto de la hidratación de la escoria blanca de acería de hea: aplicación en pastas y morteros de cemento, 2015, Vol. 2015.
3. Sahmaran, M.; Kasap, O.; Duru, K.; Yaman, I. O. Effects of mix composition and water-cement ratio on the sulfate resistance of blended cements. *Cem. Concr. Compos.* 2007, 29, 159–167, doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.11.007.
4. Vegas, I.; Urreta, J.; Frías, M.; García, R. Freeze-thaw resistance of blended cements containing calcined paper sludge. *Constr. Build. Mater.* 2009, 23, 2862–2868, doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.034.
5. Sinica, M.; Sezeman, G. A.; Mikulskis, D.; Kligys, M.; Česnauskas, V. Impact of complex additive consisting of continuous basalt fibres and SiO<sub>2</sub> microdust on strength and heat resistance properties of autoclaved aerated concrete. *Constr. Build. Mater.* 2014, 50, 718–726, doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.10.027.
6. Cánovas, M. F.; Gaitan, V. H. Behavior of steel fibre high strength concrete under impact of projectiles. *Mater. Construcción* 2012, 62, 381–396, doi:10.3989/mc.2012.00911.
7. European Committee for standardization EN 196-1: 2005 Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength.
8. European Committee for standardization EN 12350-2:2009 Testing fresh concrete. Slump-test 2011.

## **CAPÍTULO 4**

### **Fabricación y comprobación de lechadas con escorias GGBFS y LFS**





**ÍNDICE**

4.1 Introducción .....	91
4.2 Ensayo granulométrico mediante tamizado .....	92
4.2.1 Resultados .....	93
4.3 Ensayo de Fluidez .....	93
4.3.1 Resultados .....	94
4.4 Ensayo de exudación.....	96
4.4.1 Resultados .....	96
4.4.1.1 Lechadas GGBFS .....	97
4.4.1.2 Lechadas LFS1 .....	98
4.4.1.3 Lechadas LFS2 .....	100
4.4.1.4 Comparación entre todas las mezclas .....	101
4.5 Determinación de Resistencias Mecánicas. ....	102
4.5.1 Introducción .....	102
4.5.2.1 Resultados de los ensayos de la Resistencia a Flexión..	106
4.5.2.1.1 Resultados de las probetas fabricadas con escorias GGBFS.....	107
4.5.2.1.2 Resultados de las probetas fabricadas con escorias LFS1.....	109
4.5.2.1.3 Resultados de las probetas fabricadas con escorias LFS2.....	111
4.5.2.1.4 Comparación entre las escorias GGBFS, LFS1 y LFS2 .....	113
4.5.2.2 Resultados de los ensayos de la Resistencia a Compresión .....	115
4.5.2.2.1 Resultados de las probetas fabricadas con escorias GGBFS.....	115

4.5.2.2.2 Resultados de las probetas fabricadas con escorias LFS1.....	117
4.5.2.2.3 Resultados de las probetas fabricadas con escorias LFS2.....	119
4.5.2.2.4 Comparación entre las escorias GGBFS, LFS1 y LFS2. ....	121
4.6 Resumen de ideas principales.....	123
<b>4.7 Bibliografía.....</b>	<b>124</b>

## TABLAS

<i>Tabla 4. 1: Codificación de los distintos tipos de lechada. ....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 4. 2: Fluidiez (segundos) para cada una de las lechadas.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 4. 3: Valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas GGBFS.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 4. 4: Valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas LFS1.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 4. 5: Valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas LFS2.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 4. 6: Valores medios de la Resistencia a Flexión obtenidas con las escorias GGBFS.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 4. 7: Valores medios de la Resistencia a Flexión obtenidas con las escorias LFS1.....</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 4. 8: Valores medios de la Resistencia a Flexión obtenidas con las escorias LFS2.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 4. 9: Valores medios de la resistencia a compresión con escorias tipo GGBFS.....</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 4. 10: Valores medios de la resistencia a compresión con escorias tipo LFS1.....</i>	<i>117</i>
<i>Tabla 4. 11: Valores medios de la resistencia a compresión con escorias tipo LFS2.....</i>	<i>119</i>

## FIGURAS

<i>Figura 4. 1: Ensayo granulométrico mediante tamizado.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 4. 2: Cono para el ensayo de fluidiez.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 4. 3: Realización del ensayo.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 4. 4: Fluidiez de cada una de las diferentes mezclas.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 4. 5: Realización del ensayo.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 4. 6: Representación gráfica de los valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas GGBFS.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 4. 7: Representación gráfica de los valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas LFS1.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 4. 8: Representación gráfica de los valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas LFS2.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 4. 9: Ensayo de Exudación para las diferentes mezclas.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 4. 10: Ensayos de rotura a flexión.....</i>	<i>105</i>

Figura 4. 11: Ensayos de rotura compresión .....	106
Figura 4. 12: Representación gráfica de los valores medios de las roturas a flexión obtenidas con escorias GGBFS.....	108
Figura 4. 13: Evolución de la Resistencia a Flexión a lo largo del tiempo ( $MR/MRS_0$ ) .....	108
Figura 4. 14: Representación gráfica de los valores medios de las roturas a flexión obtenidas con escorias LFS1.....	110
Figura 4. 15: Evolución de la Resistencia a Flexión a lo largo del tiempo ( $MR/MRS_0$ ) .....	110
Figura 4. 16: Representación gráfica de los valores medios de las roturas a flexión obtenidas con escorias LFS2.....	112
Figura 4. 17: Evolución de la Resistencia a Flexión a lo largo del tiempo ( $MR/MRS_0$ ) .....	112
Figura 4. 18: Comparación de la resistencia a flexión de las tres escorias .....	113
Figura 4. 19: Evolución de la resistencia a Flexión a lo largo del tiempo ( $MR/MRS_0$ ) .....	114
Figura 4. 20: Representación gráfica de las medias de la rotura a compresión de las probetas fabricadas con escoria GGBFS.....	116
Figura 4. 21: Evolución de la resistencia a Flexión a lo largo del tiempo ( $MR/MRS_0$ ) .....	116
Figura 4. 22: Representación gráfica de las medias de la rotura a compresión de las probetas fabricadas con escoria LFS1.....	118
Figura 4. 23: Evolución de la resistencia a Flexión a lo largo del tiempo ( $MR/MRS_0$ ) .....	118
Figura 4. 24: Representación gráfica de las medias de la rotura a compresión de las probetas fabricadas con escoria LFS2.....	120
Figura 4. 25: Evolución de la resistencia a Flexión a lo largo del tiempo ( $MR/MRS_0$ ) .....	120
Figura 4. 26: Comparación de la resistencia a compresión de las tres escorias .....	121
Figura 4. 27: Evolución de la resistencia a Compresión a lo largo del tiempo ( $RS/RS_0$ ) .....	122



## 4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con las mezclas fabricadas con escorias GGBFS, LFS1 y LFS2. Se trata, como ya se comentó en los objetivos de la tesis, de analizar los diferentes comportamientos obtenidos según las características de la escoria. No solo por el origen dependiendo del tipo de acero fabricado, sino también por la influencia de los tratamientos posteriores a los que han sido sometidos.

En concreto, hemos trabajado con escoria de diferentes orígenes dentro del país. La campaña de ensayos final se centró en tres de estas escorias, tipo GGBFS, LFS1 y LFS2.

Se realizaron numerosos ensayos para una gran cantidad de combinaciones de escoria-cemento-agua. Para ello se elaboraron probetas con distintos porcentajes de sustitución (desde el 30 al 50%). En todas ellas se aseguró un buen curado de las mismas permaneciendo sumergidas con control de temperatura entre 21° y 22°.

La comparativa entre las lechadas fabricadas con sustitución de cemento por escorias, y las lechadas fabricadas con cemento Portland, tomadas como referencia de comportamiento, se centrará en su docilidad y en su capacidad resistente, ya que el objetivo principal de estas pruebas es identificar los efectos de la sustitución de escoria por cemento en la respuesta mecánica y en la trabajabilidad de la mezcla, parámetros fundamentales a tener en cuenta, a priori, para determinar la viabilidad de la lechada con esta relación agua/cemento, en este caso relación 1/1. Relación marcada por la empresa Geocisa que forma parte del Proyecto por el cual deriva esta Tesis, para la realización de sus pruebas experimentales con los resultados obtenidos.

A continuación, y antes de comenzar con la relación de los ensayos mencionados, se comentará la nomenclatura escogida para definir cada uno de las mezclas que se van a fabricar. (Tabla 4.1).

Tipo de escorias	Codificación	% de Sustitución
Cemento 42,5	S	0
Escorias Alto Horno	GGBFS	30
Escorias Arco Eléctrico (LFS)	LFS1	40
Escorias Arco Eléctrico (LFS)	LFS2	50

Tabla 4. 1: Codificación de los distintos tipos de lechada.

Se combinan cada una de ellas en función de la codificación de cada escoria y su porcentaje de sustitución, como ejemplo pondremos que la lechada fabricada con la escoria GGBFS y un porcentaje de sustitución del 30 % se le denominará **GGBFS30**.

Una vez explicado esto desarrollaremos los ensayos a los que se han sometido las diferentes lechadas fabricadas.

## 4.2 Ensayo granulométrico mediante tamizado

El ensayo se ha llevado a cabo siguiendo la norma EN-445 [1], consiste en verter 1 litro de lechada recién mezclada a través de un tamiz de 150 mm de diámetro con un abertura de malla  $\leq 2$  mm, con objeto de verificar la ausencia de grumos. Este ensayo se realiza mientras se llena el cono para el ensayo de fluidez (Figura 4.1).



Figura 4. 1: Ensayo granulométrico mediante tamizado

### 4.2.1 Resultados

Para todas las amasadas de lechadas, tanto de cemento Portland como con sustituciones de escoria se consigna que, al verter la lechada, haciéndola pasar por el tamiz, no se producen asentamientos en éste, por lo que se comprueba la ausencia de grumos sobre el tamiz.

### 4.3 Ensayo de Fluidiez

La fluidez es una propiedad importante que indica la trabajabilidad (docilidad) de la lechada para garantizar una inyección y bombeo eficientes [2].

Para la realización de este ensayo, se describen dos métodos según la norma EN-445, en su apartado 4.3.1 [1]. El método del cono de Marsh y el ensayo del escurrimiento de la lechada. En este caso, como la relación agua/cemento es de 1/1, se elige el método del cono.

Determina la fluidez de una lechada en estado fresco. La prueba para el flujo de mezclas de lechada (método del Cono de Marsh) se ha determinado de acuerdo con la norma EN 445 [1]. La prueba determina el tiempo de salida de un volumen específico de lechada de cemento fluido a través de un cono de flujo estandarizado.

Antes de comenzar, el interior del cono se humedece llenando el cono con agua. El agua se drena del cono un minuto antes de la prueba. El cono está montado de modo que su eje está en posición vertical y su diámetro más grande en la parte superior, permaneciendo firmemente en esa posición, evitando que vibre. Luego la lechada se introduce en el cono. La lechada se vierte lentamente, para evitar el aire atrapado. La cantidad probada fue de un litro de mezcla. Una vez lleno, se inicia el cronómetro y, simultáneamente, se retira el tope, (Figura 4.2). El resultado registrado será el tiempo en el que toda la lechada pasa a través del cono.





Figura 4. 2: Cono para el ensayo de fluidez

Según la norma EN-447 [3], la fluidez inmediatamente después de la mezcla, con éste método de ensayo debe ser, reflejada en tiempo  $t_0 \leq 25$  s.

### 4.3.1 Resultados

En la figura 4.3, se observa la realización del ensayo.



Figura 4. 3: Realización del ensayo

Los resultados de la prueba de cono de flujo se muestran en la Tabla 4.2 y de forma gráfica en la Figura 4.4. Como se aprecia en la figura, no se advierten diferencias significativas entre las diferentes mezclas. Los resultados de la prueba del cono de flujo siempre están comprendidos en un intervalo de 8,5 a 9 s. La principal diferencia es que el uso de estos tipos de escorias como sustituto del cemento en la lechada cementosa no tiene un efecto significativo en la fluidez de la mezcla resultante, al menos en porcentajes de sustitución de hasta el 50%.

Esta es una conclusión importante porque asume que estas nuevas mezclas no presentarán desventajas en su aplicación con respecto a las originales, al aprovechar las mismas tecnologías de implementación.

Fluidez (s)				
% Sustitución	S0	GGBFS	LFS1	LFS2
30	9	8,5	8,5	8,5
40	9	8,5	8,5	9
50	9	9	8,5	9

Tabla 4. 2: Fluidez (segundos) para cada una de las lechadas

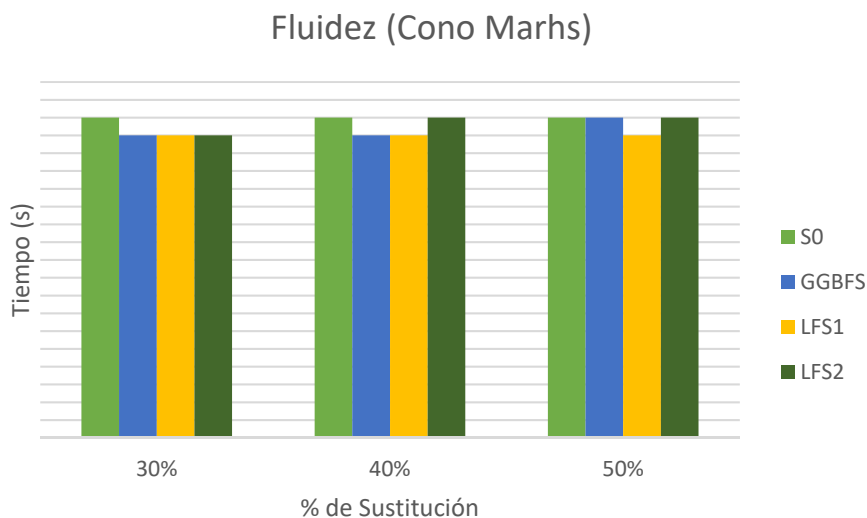


Figura 4. 4: Fluidez de cada una de las diferentes mezclas

## 4.4 Ensayo de exudación

Esta prueba nos da la exudación de la lechada. Se ha llevado a cabo de acuerdo con la norma EN 445 [1]. La exudación se mide como el volumen de agua que queda en la superficie de la mezcla que se ha mantenido protegida de la evaporación. La variación en el volumen se mide como una diferencia en el porcentaje del volumen de la lechada entre el inicio y el final de la prueba. Mide principalmente la variación de volumen causada por la sedimentación o expansión. Se ha utilizado un tubo transparente de 65 mm de diámetro interno y de 1 m de longitud. El ensayo se ha desarrollado de la siguiente forma:

- El tubo se coloca en posición vertical con el extremo superior abierto.
- Se asegura una fijación rígida que evita cualquier movimiento o vibración.
- La lechada se vierte en el tubo con un flujo constante, para garantizar que no quede aire atrapado. El tubo se llena a una altura,  $h_0$ . La temperatura ambiente del laboratorio fue de 18.1 ° C y la lechada adquiere una temperatura de 18.3 ° C. Se registran el tiempo de inicio  $t_0$  y la altura  $h_0$ .
- La altura,  $h_g$ , se registra a intervalos de 15 min durante la primera hora y luego a las 2 h, 3 h.
- La altura del agua exudada,  $h_w$ , se registra al mismo tiempo que se realizan las mediciones de la lechada. Se registran las posibles heterogeneidades que se pueden ver en su aspecto a través del tubo transparente.

### 4.4.1 Resultados

En la Figura 4.5, se puede observar la realización del ensayo, y posteriormente, se exponen los resultados del ensayo de exudación para cada una de las mezclas.



Figura 4. 5: Realización del ensayo

En la Figura 4.5 se aprecia la decantación que van teniendo las mezclas a medida que pasa el tiempo.

#### 4.4.1.1 Lechadas GGBFS

En la Tabla 4.3 se muestran los resultados del porcentaje de exudación realizadas con las mezclas GGBFS. Se ha realizado para cada una de las amasadas exponiendo en la tabla el valor promedio.

Tiempo (min)	% h <sub>w</sub> exudada (GGBFS)			
	S0	GGBFS30	GGBFS40	GGBFS50
0	0	0	0	0
15	2,04	1,33	1,33	1,33
30	8,30	2,67	2,42	2,33
45	9,36	3,67	3,67	3,67
60	12,78	6,00	5,55	5,33
120	25,17	15,33	15,33	15,33
180	28,02	20,00	18,45	17,67
240	28,21	20,67	18,56	17,67

Tabla 4. 3: Valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas GGBFS

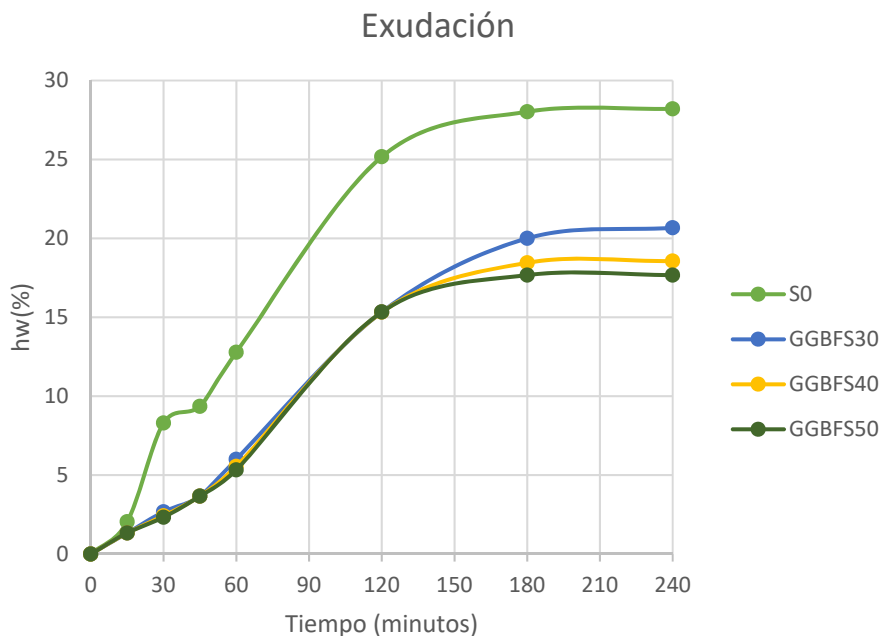


Figura 4. 6: Representación gráfica de los valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas GGBFS

En la Figura 4.6 se observa la exudación en este tipo de mezcla, como la mezcla sin sustitución de escoria (S0) desde el inicio, exuda considerablemente más que las mezclas con sustitución, en cambio las mezclas con sustitución de escoria van disminuyendo el porcentaje de agua exudada conforme aumenta el porcentaje de sustitución hasta los 180 minutos, a partir de ahí prácticamente se estabiliza.

#### 4.4.1.2 Lechadas LFS1

Al igual que en las mezclas anteriores, en la Tabla 4.4 se muestran los resultados de los valores medios de los porcentajes de agua exudada en las mezclas LFS1.

% hw exudada (LFS1)				
Tiempo (min)	S0	LFS130	LFS140	LFS150
0	0	0	0	0
15	2,04	2,67	2,98	3,33
30	8,30	4,67	5,78	6,67
45	9,36	8,00	8,64	9,33
60	12,78	11,00	11,76	12,67
120	25,17	20,00	16,34	14,00
180	28,02	20,33	18,65	15,33
240	28,21	20,67	17,87	16,33

Tabla 4. 4: Valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas LFS1

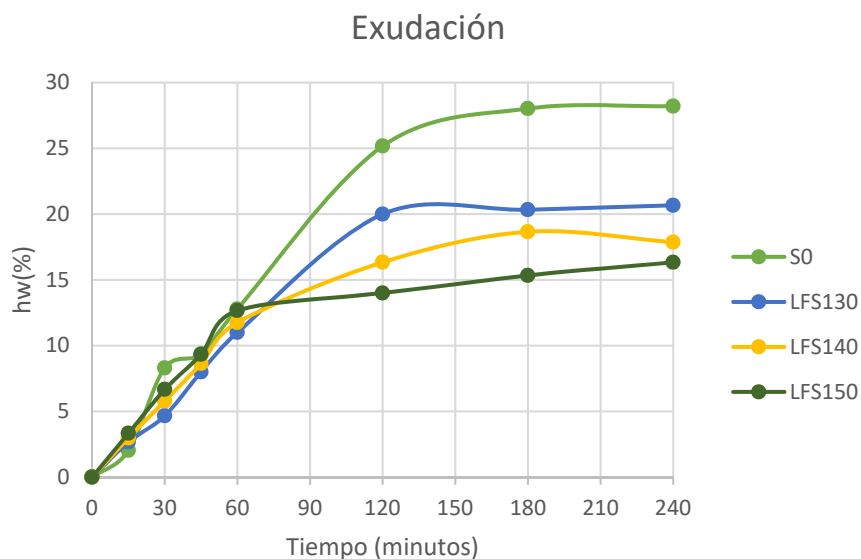


Figura 4. 7: Representación gráfica de los valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas LFS1

Aquí, desde el inicio, todas las mezclas se comportan prácticamente de la misma forma, pero a partir de los 60 minutos, la mezcla que más agua exuda es la S0, y al igual que en las mezclas GGBFS, conforme va aumentando el tiempo la exudación va disminuyendo, observándose que la exudación disminuye conforme se aumenta el porcentaje de sustitución.

#### 4.4.1.3 Lechadas LFS2

En la Tabla 4.5 se muestran los resultados del porcentaje de exudación realizadas con las mezclas LFS2.

% hw exudada (LFS2)				
Tiempo (min)	S0	LFS230	LFS240	LFS250
0	0	0	0	0
15	2,04	4,00	4,00	4,00
30	8,30	7,67	7,98	8,33
45	9,36	11,00	11,40	12,67
60	12,78	15,00	15,10	16,00
120	25,17	23,00	24,80	26,33
180	28,02	24,00	25,70	26,67
240	28,21	24,00	26,30	27,67

Tabla 4. 5: Valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas LFS2

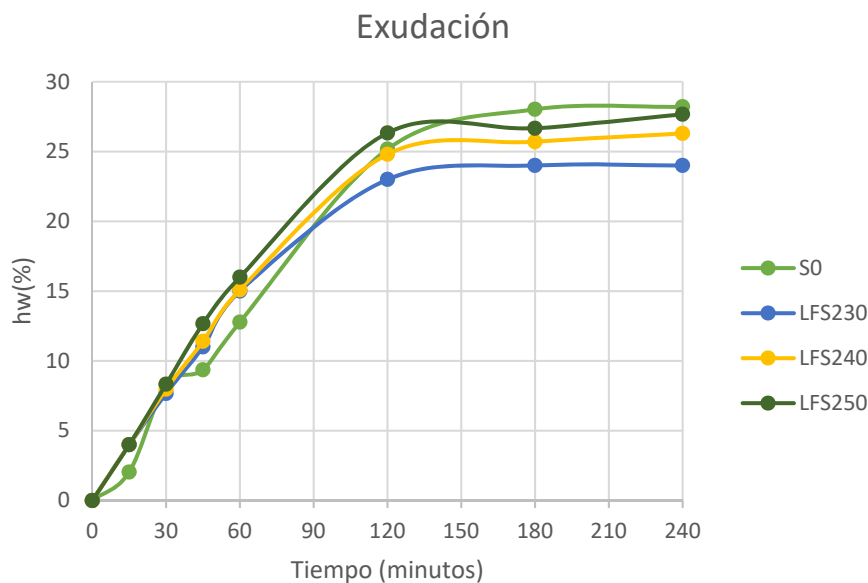


Figura 4. 8: Representación gráfica de los valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas LFS2

En la Figura 4.8, se observa como en este tipo de mezclas desde el inicio hasta aproximadamente los 90 minutos, la mezcla que menos agua exuda

es la que no tiene porcentaje de sustitución, siendo esa disminución mínima. A partir de ese tiempo el porcentaje de agua exudada va aumentando conforme el porcentaje de sustitución es más alto, siempre alcanzado el máximo la mezcla sin porcentaje (S0).

#### 4.4.1.4 Comparación entre todas las mezclas

En la Figura 4.9 se muestra la comparativa entre todas las mezclas realizadas, tomando como referencia la mezcla S0, sin sustitución de escoria.

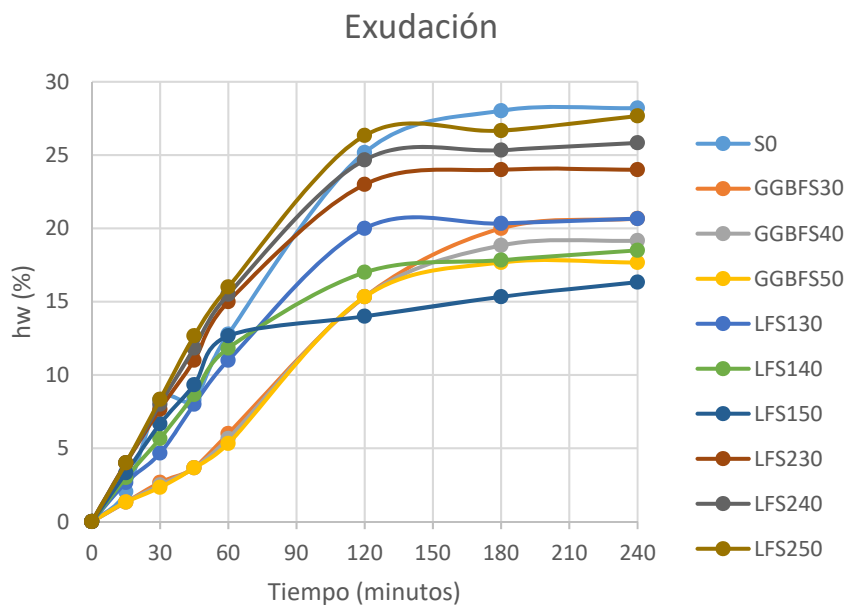


Figura 4. 9: Ensayo de Exudación para las diferentes mezclas

Como distinguimos en la figura, la mezcla sin sustitución de cemento por escoria es la que muestra un mayor porcentaje de exudación de agua a los 240 min, obteniendo un valor de casi el 30%.

Las lechadas GGBFS tienen valores bajos de exudación en etapas tempranas de hasta 120 minutos y obtienen los porcentajes más bajos a los 240 minutos, excepto la mezcla de LFS230 con un 30% de sustitución.



La escoria LFS1 muestra un comportamiento de exudación similar al de la mezcla de referencia, aunque obtienen porcentajes de exudación de agua superiores a los del resto de las escorias.

Con respecto al porcentaje de sustitución, los resultados muestran claramente que cuanto mayor sea el porcentaje de sustitución, mayor será el nivel de exudación de agua para las escorias LFS2 y una disminución en la exudación a medida que el porcentaje de sustitución aumenta para la escoria GGBFS y LFS1.

## **4.5 Determinación de Resistencias Mecánicas.**

### **4.5.1 Introducción**

El principal objetivo de esta investigación es calcular, evaluar y analizar el comportamiento mecánico de la lechada, cuando se le incorporan distintos porcentajes y distintas escorias para su fabricación, en lo que se refiere a su comportamiento a la resistencia a compresión principalmente, ya que es una indicación de la calidad de la lechada con respecto a su unión y resistencia al corte. Así mismo, también se han realizado ensayos para determinar la resistencia a la flexión, ya que, al ser un material nuevo, podemos en función de los resultados buscar nuevas aplicaciones para él. Utilizarlas para casos no estructurales, como puede ser, decoración y/o albañilería.

Con objeto de evaluar la influencia de la dosificación y tipo de cemento empleado en las propiedades mecánicas, se determinaron las resistencias a compresión y a flexión de las lechadas de cemento estudiadas.

### **4.5.2 Proceso de elaboración de los ensayos mecánicos**

Se determinaron la resistencias mecánicas mediante probetas cúbicas de 4 cm de arista, procedentes de la rotura de las probetas prismáticas de 4 x 4 x 16 cm, al ser el procedimiento habitual en la industria por asimilación con la Norma para morteros de cemento [4]. Para cada tipo de cemento,

relación a/c y edad se ensayaron nueve probetas. En primer lugar, se determinó la resistencia a flexión de cada una de ellas. Como consecuencia de la rotura a flexión, cada probeta quedó dividida en dos partes. Según Neville [5] la resistencia de la probeta cubo modificada, resultaría un 5% mayor que la probeta cubo normal del mismo tamaño, a causa de la contención debida a los excesos laterales en relación al cubo. De este estudio se obtendría una relación media, ya que sólo se realizó el ensayo mediante 2 cubos por cada una de las probetas ensayadas para flexotracción. A continuación, cada una de estas partes se ensayó a compresión. Con ello se lograron nueve valores de la resistencia a flexión y dieciocho de la resistencia a compresión, para finalmente calcular el promedio de cada una de ellas.

Para la fabricación del material que se va a investigar, se define desde el inicio un modelo particular de dosificación, con distintos porcentajes de sustitución de cemento por distintos tipos de escorias siderúrgicas, lo cual nos llevará a ver el comportamiento de la lechada, partiendo de proposiciones de leyes de mezclas reales y una justificación elástica, admitiendo que todas las fracciones de volumen de los componentes están sujetos a la misma tensión y deformación.

La rotura de las probetas se llevó a cabo mediante una máquina de ensayo controlada por ordenador mediante un sistema ETIWIN, con certificado de calibración de ENAC, que cumple con las especificaciones de la norma europea EN 12390-5 [6]. Para el ensayo de resistencia a flexión a la prensa se le instaló el correspondiente dispositivo de carga para la determinación de la resistencia a flexión, que se describe en el apartado 4.7 de la citada norma EN 196-1 [4]. Este dispositivo de flexión incorpora dos rodillos de apoyo de acero de  $(10 \pm 0,5)$  mm de diámetro, distantes uno del otro en  $(100 \pm 0,5)$  mm y un tercer rodillo de carga de acero del mismo diámetro que los anteriores y equidistantes de los otros dos. La longitud de estos rodillos está comprendida entre 45 y 50 mm.

En cuanto a la aplicación de la carga, se realiza de forma continua y sin choques bruscos. La fuerza no comienza a aplicarse hasta que el rodillo de

carga y los de apoyo no descansen firmemente sobre la probeta (Figura 4.10). El incremento de velocidad  $R$  que se selecciona será conforme a la expresión:

$$R = \frac{2 * s * d_1 * d_2^2}{3 * l} \frac{N}{s} \quad (1)$$

Siendo  $d_1$  y  $d_2$  las dimensiones laterales de la sección cuadrada de la probeta y  $l = 3 \cdot d$  la distancia entre rodillos en milímetros.

La velocidad de aplicación obtenida desarrollada de la expresión (1) es,

$$R = \frac{2 * 0,06 * 40 * 40^2}{3 * 160} = 16 \frac{N}{s}$$

La señal de fuerza es proporcionada por una célula de carga ajustable tanto al puente superior, como al inferior o a la base. Está formada por un puente de wheatstone de galgas extensométricas, adherido a una estructura cuya deformación, producida por una fuerza exterior, provoca la aparición de un ligero desequilibrio resistivo en el puente, que se traduce en una diferencia de potencial proporcional a la fuerza ejercida.

La fuerza que capta la célula de carga es, debido a su situación, la misma que sufre la probeta bajo ensayo, es decir, existe un acoplamiento directo entre la probeta a ensayar y la célula de carga. De este modo el esfuerzo se realiza sobre la misma célula de carga.



Figura 4. 10: Ensayos de rotura a flexión.

En el caso del ensayo de resistencia a compresión, también hay que instalar un dispositivo de compresión, que se recoge en el apartado 4.9 de la norma EN 196-1 [4]. Éste consta de una placa superior en la que está incorporada una rótula autoblocante esférica con un centro de giro sobre la base de la placa. Esto evita que se produzcan esfuerzos laterales, por lo que las fuerzas se aplican de forma axial sobre las probetas de ensayo. Desde el ordenador se realiza un control automático cerrado desde 2000 Kg, de esta forma las cargas se aplican de manera uniforme y constante. Para controlar la fuerza aplicada la máquina consta de un software que permite un control preciso del ensayo. Para la ejecución del ensayo se coloca la probeta, la mitad de las de 16×16×4 cm que se rompieron a flexión, y se comprime hasta su rotura, en el dispositivo se registra la carga máxima a la que ha sido sometida y con ello se calcula la resistencia a compresión. La carga aplicada fue a velocidad constante de 0.5 MPa/s. Para la expresión de resultados la resistencia a compresión viene dada por la expresión (2):

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (2)$$

Donde;  $f_c$  es la resistencia a compresión en MPa (N/mm<sup>2</sup>);  $F$  es la carga máxima de rotura expresada en Newton y  $A_c$  es el área transversal de la probeta dada en mm<sup>2</sup>. Como se muestra en la Figura 4.11.



Figura 4. 11: Ensayos de rotura compresión

La resistencia a la compresión de la lechada es la característica mecánica principal de ésta, y se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área.

En esta primera parte de la investigación, los ensayos se realizan a 7, 28 y 90 días, de acuerdo con las normas EN 196-1 [4] y EN 196-7 [7], para poder calcular la resistencia a compresión de la lechada.

#### 4.5.2.1 Resultados de los ensayos de la Resistencia a Flexión

La resistencia a flexión es la capacidad de un material de soportar fuerzas aplicadas perpendicularmente a su eje longitudinal. Evalúa la resistencia que tiene el material no reforzado a la rotura, se denomina “módulo de rotura”, es un parámetro importante para los materiales frágiles. Este ensayo es interesante sobre todo para establecer estos modelos, o ecuaciones constitutivas, utilizando métodos donde los parámetros se deducen a partir de las propiedades físicas de las fracciones volumétricas del hormigón o el método empírico en el que se intuye un modelo parametrizado que se ajusta a partir de resultados experimentales como los que se desarrollan en esta tesis.

El objetivo del ensayo de flexión es determinar las propiedades mecánicas de los materiales relacionadas con los esfuerzos y flechas (deformaciones)

en los puntos máximo y de rotura, y módulo elástico en flexión teniendo en cuenta la separación entre apoyos calculada a partir del espesor de la probeta.

Se expresa como el Módulo de Rotura (MR) y se determina mediante los métodos de ensayo. Estos métodos son interesantes, ya que es un parámetro fundamental para los materiales frágiles.

En esta primera parte de la investigación, los ensayos se realizan a 7, 28 y 90 días. Los métodos utilizados han sido los mismos que para la rotura a flexión del hormigón.

Para mostrar los resultados se han elaborado una serie de tablas y gráficas objeto de esta investigación, por lo que no tendrán referencias.

#### 4.5.2.1.1 Resultados de las probetas fabricadas con escorias GGBFS

En la Tabla 4.6, se detallan los resultados medios de la rotura a flexión de las probetas realizadas con sustitución de escorias GGBFS.

Flexión (MPa)				
	7 días	28 días	90 días	% de ganancia a 90 días
<b>GGBFS0</b>	2,45	3,35	3,92	0
<b>GGBFS30</b>	1,79	2,64	4,07	4
<b>GGBFS40</b>	1,69	3,27	4,28	9
<b>GGBFS50</b>	1,65	3,46	4,63	18

Tabla 4. 6: Valores medios de la Resistencia a Flexión obtenidas con las escorias GGBFS

Con los datos reflejados en la Tabla 4.6, se ha realizado una representación gráfica mediante diagramas de barras la Figura 4.12, y en la Figura 4.13 se realiza una gráfica de la evolución de la resistencia a flexión de estas escorias con respecto a la de referencia MR<sub>S0</sub>, de forma adimensional.

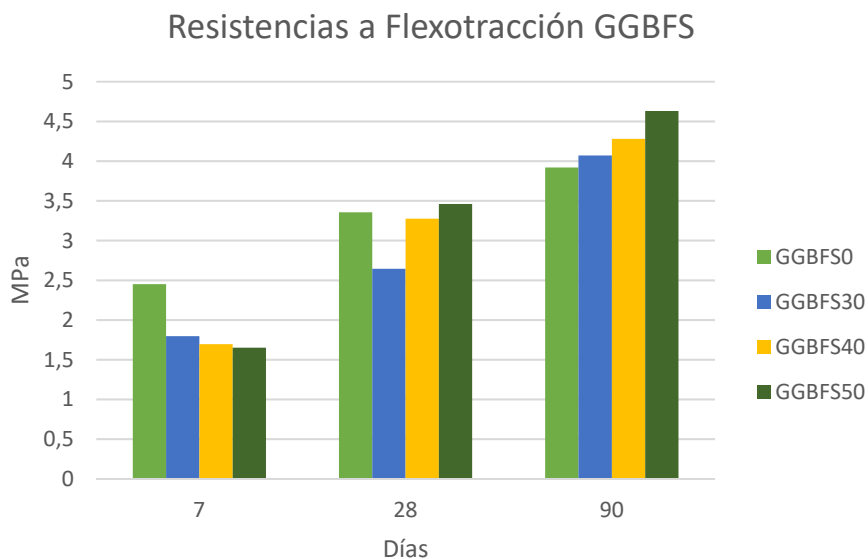


Figura 4. 12: Representación gráfica de los valores medios de las roturas a flexión obtenidas con escorias GGBFS

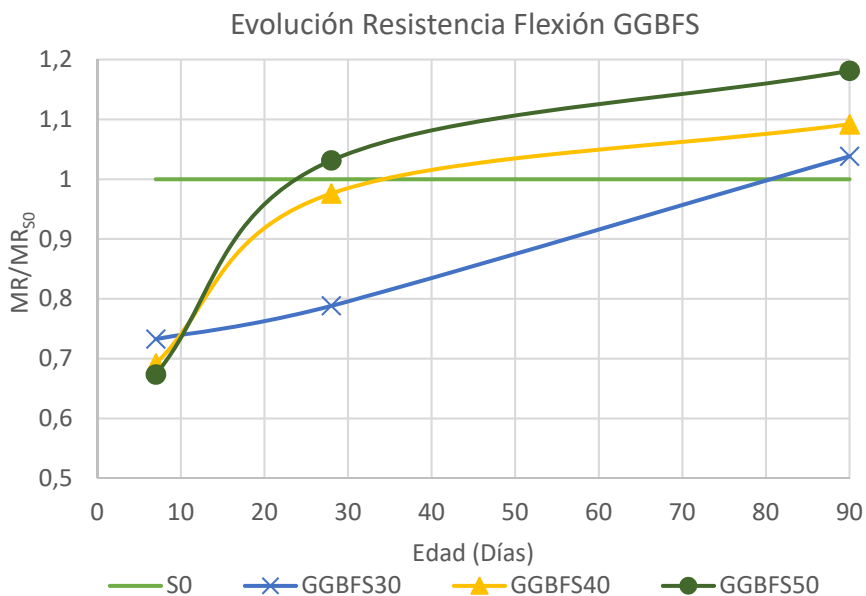


Figura 4. 13: Evolución de la Resistencia a Flexión a lo largo del tiempo ( $MR/MRS_0$ )

Ninguna de las mezclas con sustitución de escoria, logra a los siete días, alcanzar la resistencia a flexión de la mezcla de referencia (S0). Sin embargo, a los 28 días, aunque la mezcla con sustitución del 30% disminuye, las que tienen un 40 y 50% de escoria prácticamente se igualan a la mezcla de referencia. Mientras que a los 90 días presentan un aumento en la resistencia a la flexión por cada fracción de sustitución (30, 40 y 50%).

#### 4.5.2.1.2 Resultados de las probetas fabricadas con escorias LFS1

Al igual que con las mezclas anteriores, en la Tabla 4.7, se muestran los resultados medios de la rotura a flexión de las probetas realizadas con sustitución de escorias LFS1.

Flexión (MPa)				
	7 Días	28 Días	90 Días	% ganancia a 90 días
<b>LFS10</b>	2,45	3,35	3,92	0
<b>LFS130</b>	1,44	2,90	4,29	9,44
<b>LFS140</b>	1,70	3,50	3,69	-5,87
<b>LFS150</b>	1,35	2,61	3,60	-8,16

Tabla 4. 7: Valores medios de la Resistencia a Flexión obtenidas con las escorias LFS1

A continuación, se muestra la Figura 4.14, en la cual se representan mediante diagrama de barras los valores de la Tabla 4.7, y en la Figura 4.15 la evolución con respecto a la mezcla de referencia (S0), de forma adimensional.



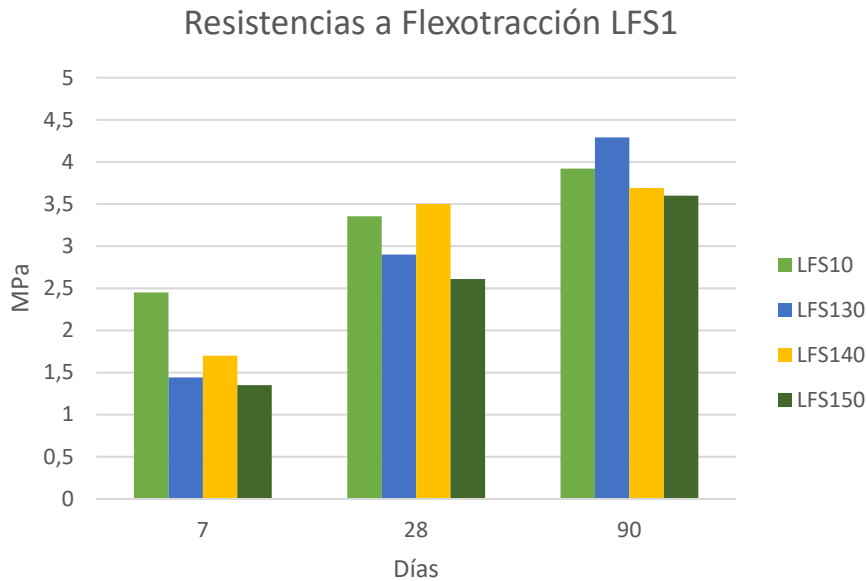


Figura 4. 14: Representación gráfica de los valores medios de las roturas a flexión obtenidas con escorias LFS1

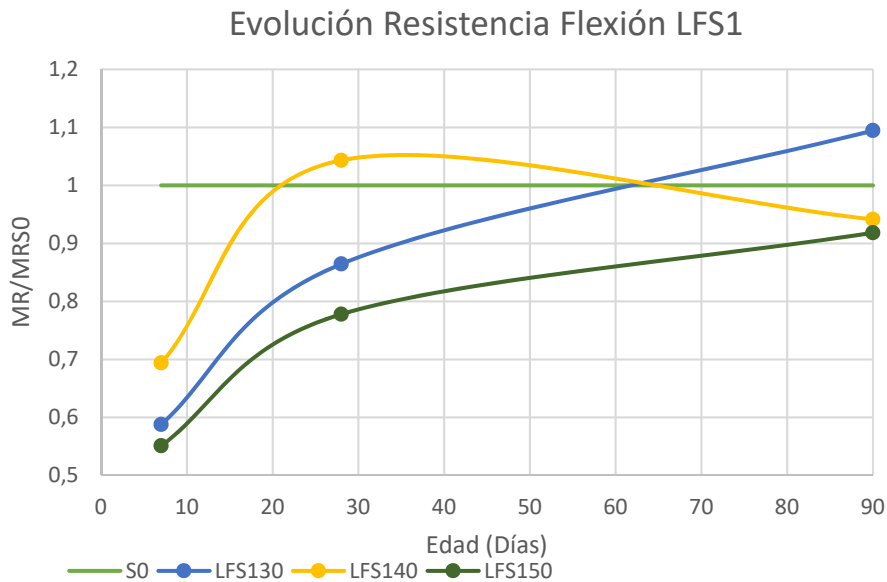


Figura 4. 15: Evolución de la Resistencia a Flexión a lo largo del tiempo ( $MR/MR_{S0}$ )

Para esta escoria, a los siete días, todas las mezclas con adiciones disminuyen con respecto a la convencional. Para los 28 días más o menos todos los porcentajes se comportan como la que no tiene porcentaje de escorias. Mientras que a los 90 días el porcentaje que se comporta mejor es del 30% de sustitución que aumenta su resistencia por encima de todas.

#### 4.5.2.1.3 Resultados de las probetas fabricadas con escorias LFS2

Al igual que con las mezclas anteriores, en la Tabla 4.8, se muestran los resultados medios de la rotura a flexión de las probetas realizadas con sustitución de escorias LFS2.

Flexión (MPa)				
	7 Días	28 Días	90 Días	% ganancia a 90 días
<b>LFS20</b>	2,45	3,35	3,92	0
<b>LFS230</b>	1,17	2,39	2,21	-43,62
<b>LFS240</b>	0,88	1,83	1,46	-62,76
<b>LFS250</b>	0,51	1,16	1,29	-67,09

Tabla 4. 8: Valores medios de la Resistencia a Flexión obtenidas con las escorias LFS2

A continuación, se muestra la Figura 4.16, en la cual se representan mediante diagrama de barras los valores de la Tabla 4.8 y en la Figura 4.17 la evolución con respecto a la mezcla de referencia S0, de forma adimensional.

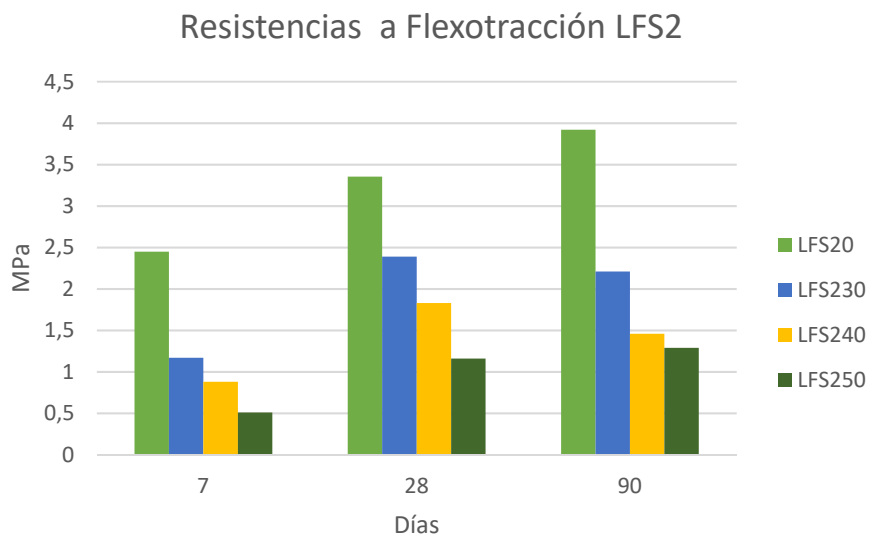


Figura 4. 16: Representación gráfica de los valores medios de las roturas a flexión obtenidas con escorias LFS2



Figura 4. 17: Evolución de la Resistencia a Flexión a lo largo del tiempo (MR/MRS0)

Con la sustitución de estas escorias se puede ver que se pierde resistencia con todos los porcentajes, siendo más acusada esa pérdida tanto a los 7 como a los 90 días, y menos a los 28.

#### 4.5.2.1.4 Comparación entre las escorias GGBFS, LFS1 y LFS2

En la Figura 4.18, los datos se agrupan según el tiempo y el porcentaje de sustitución para cada tipo de escoria. La figura 4.19 también permite analizar el comportamiento de cada mezcla con respecto a la referencia. Cada curva de resultados (MR) no está dimensionada con respecto al valor correspondiente de S0 ( $MR_{S0}$ ).

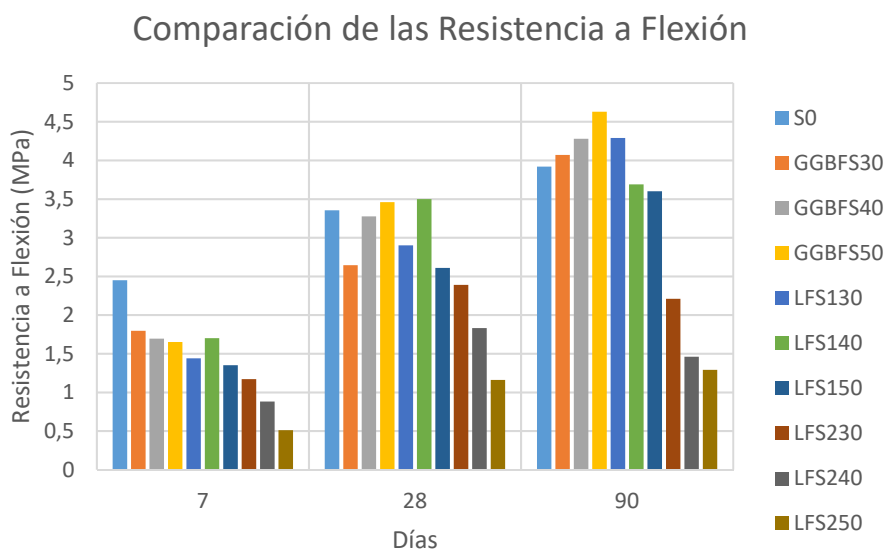


Figura 4. 18: Comparación de la resistencia a flexión de las tres escorias

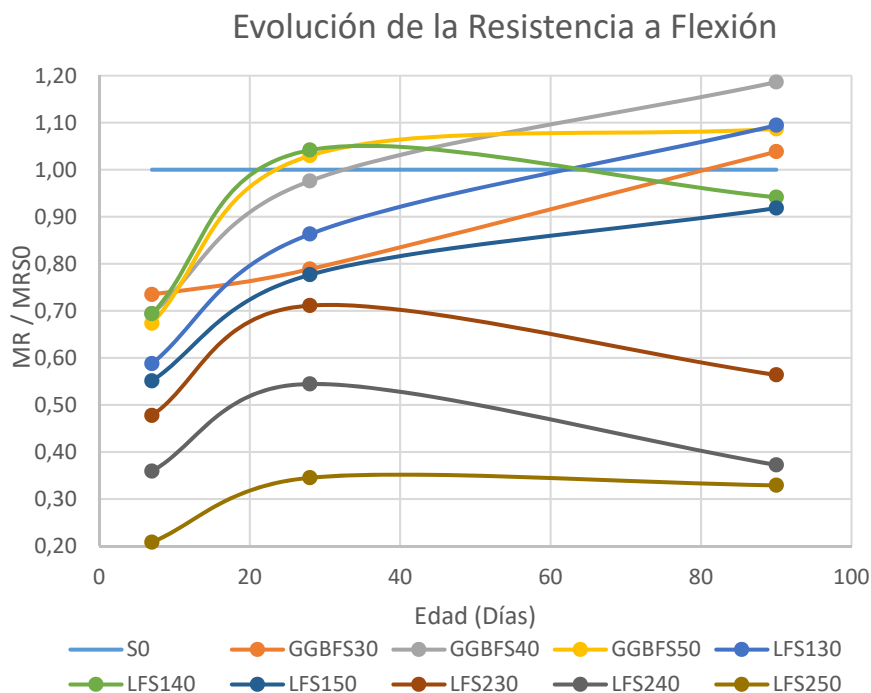


Figura 4. 19: Evolución de la resistencia a Flexión a lo largo del tiempo ( $MR/MR_{50}$ )

Las mezclas con sustitución de escoria no logran la referencia de resistencia a la flexión (S0) a los siete días. Sin embargo, a los 28 días de prueba, la diferencia de MR se reduce entre S0 y dos de los tipos de escoria (GGBFS y LFS1). Uno de los efectos observados con la escoria es que el proceso de endurecimiento de la mezcla se modifica y retrasa, como se refleja en investigaciones anteriores [8].

La mezcla GGBFS40 muestra el mejor desempeño de todos en esta prueba, obteniendo una ganancia de resistencia a la flexión de hasta el 18.6% a los 90 días con la sustitución del 40%.

Las escorias GGBFS son las únicas que presentan un aumento en la resistencia a la flexión a los 90 días por cada fracción de sustitución (GGBFS30, GGBFS40 y GGBFS50). Por otro lado, la escoria LFS2 mostró malos resultados para esta prueba. Como se observa en la Figura 4.17, la pérdida de resistencia a la flexión para este tipo de escoria aparece

a los 7, 28 y 90 días, siendo la pérdida mayor a medida que aumenta el porcentaje de sustitución.

#### 4.5.2.2 Resultados de los ensayos de la Resistencia a Compresión

Con la rotura a flexión de cada probeta se le ha realizado la rotura a compresión a 7, 28 y 90 días, a cada uno de los trozos de cada una de ellas (18 probetas), con lo que se ha realizado el promedio para el cálculo de las roturas. Los ensayos a compresión de las probetas se han realizado siguiendo el procedimiento propuesto en la normativa EN 196-1 para ensayos del hormigón con la diferencia que en lugar de ser probetas cúbicas de 10x10 cm han sido las mitades de las probetas de 4x4x16 cm, por lo tanto, sólo se ha adaptado la máquina a una probeta más pequeña como se ha comentado en el capítulo anteriormente.

Para mostrar los resultados se han elaborado una serie de tablas y gráficas objeto de esta investigación, por lo que no tendrán referencias.

##### 4.5.2.2.1 Resultados de las probetas fabricadas con escorias GGBFS

Evalúamos en la tabla 4.9 las medias de las roturas a compresión a 7, 28 y 90 días de las probetas fabricadas con la escoria GGBFS. Estas medias son el resultado de la rotura de nueve probetas provenientes de tres amasadas realizadas con este tipo de escoria.

Compresión (MPa)				
	7 Días	28 Días	90 Días	% ganancia a 90 días
<b>GGBFS0</b>	6,3	8,9	12,5	0
<b>GGBFS30</b>	4,4	7,0	13,2	5,79
<b>GGBFS40</b>	4,4	8,7	15	19,56
<b>GGBFS50</b>	4,5	11,4	16,9	34,98

Tabla 4. 9: Valores medios de la resistencia a compresión con escorias tipo GGBFS

A continuación, en las figura 4.20 y 4.21 se muestran de forma gráfica, los resultados reflejados en la tabla 4.9, donde se puede observar la forma de

evolución de la resistencia para las diferentes roturas realizadas, y la evolución con respecto a la mezcla de referencia S0, de forma adimensional.

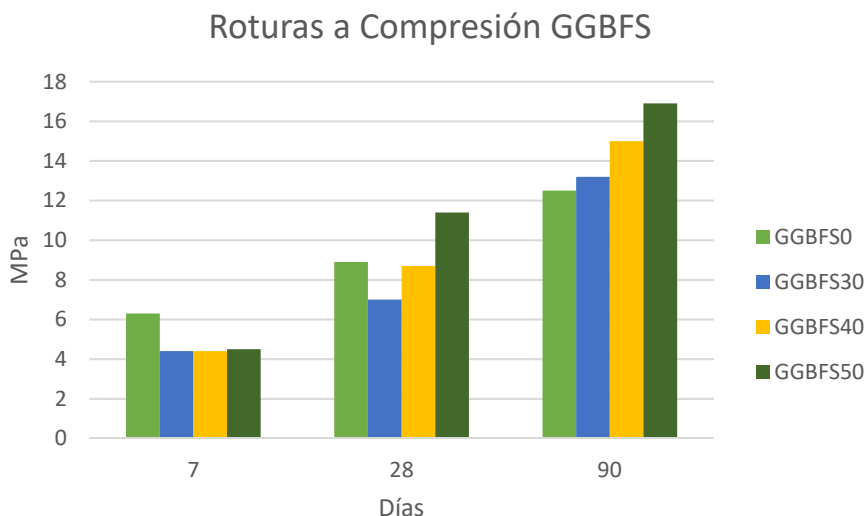


Figura 4. 20: Representación gráfica de las medias de la rotura a compresión de las probetas fabricadas con escoria GGBFS

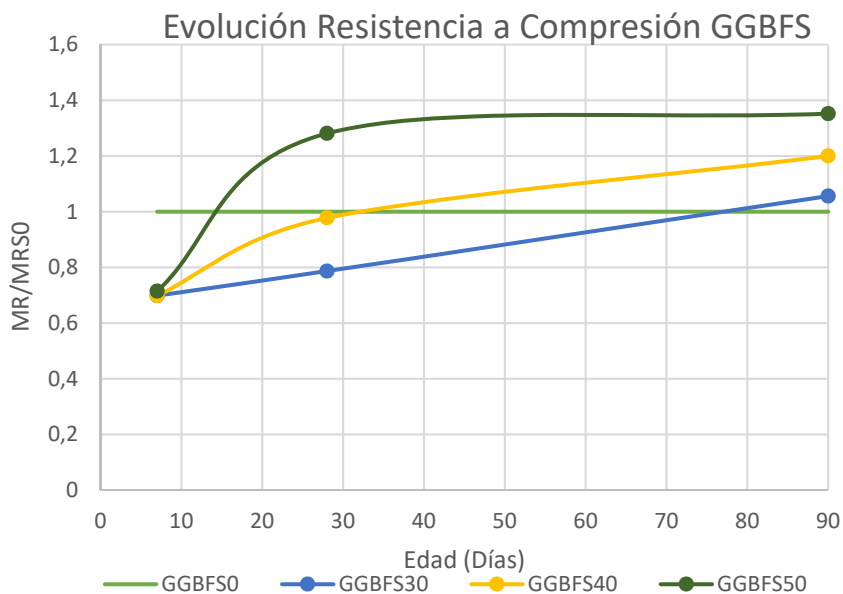


Figura 4. 21: Evolución de la resistencia a Flexión a lo largo del tiempo ( $MR/MR_{S0}$ )

Como se refleja en la Figura 4.21, a edades tempranas, en este caso a 7 días, la lechada de cemento adquiere más rápidamente la resistencia a compresión que las fabricadas con escorias, pero, por el contrario, con el paso del tiempo todas las fabricadas con escoria superan la resistencia sustancialmente, llegando a la del porcentaje de sustitución del 50% al 35% más de resistencia a los 90 días. También se observa que la resistencia a la compresión de la escoria GGBFS crece a medida que aumenta el porcentaje de sustitución, ya que en la composición química la escoria tiene mayor porcentaje de  $\text{SiO}_2$  que el cemento. El comportamiento de la mezcla del 40% es similar al 30%. El mejor rendimiento de compresión se puede atribuir a la mezcla del 50%, que obtuvo una ganancia de fuerza a los 28 y 90 días del 28, 35 y 35%, respectivamente.

#### 4.5.2.2.2 Resultados de las probetas fabricadas con escorias LFS1

En la Tabla 4.10 se muestran las medias de las roturas a compresión a 7, 28 y 90 días de las probetas fabricadas con la escoria LFS1. Estas medias son el resultado de la rotura de dieciocho probetas provenientes de tres amasadas realizadas con este tipo de escoria.

Compresión (MPa)				
	7 Días	28 Días	90 Días	% ganancia a 90 días
<b>LFS10</b>	6,3	8,9	12,5	0
<b>LFS130</b>	3,2	6,4	9,3	-25,96
<b>LFS140</b>	4,0	8,1	9,1	-27,44
<b>LFS150</b>	3,1	6,3	7,3	-41,42

Tabla 4. 10: Valores medios de la resistencia a compresión con escorias tipo LFS1

A continuación, en las figuras 4.22 y 4.23, se muestran de forma gráfica los valores recogidos en la tabla 4.10.



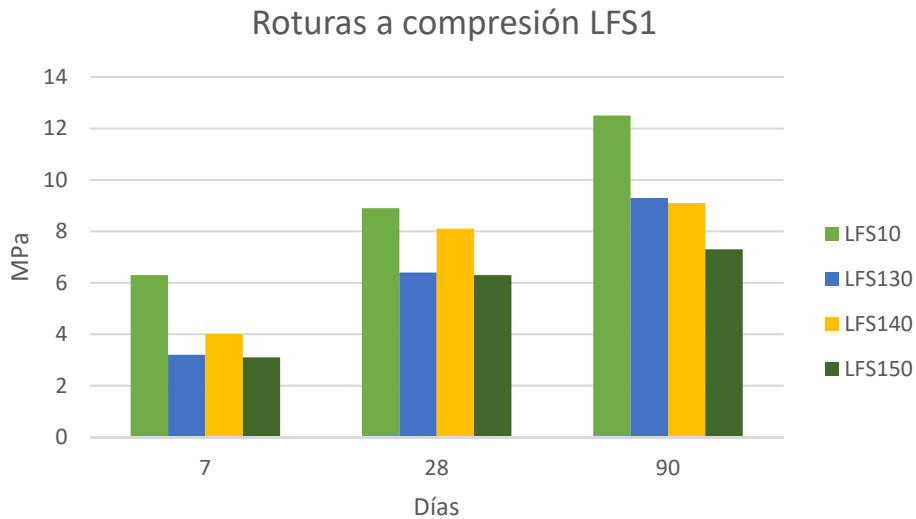


Figura 4. 22: Representación gráfica de las medias de la rotura a compresión de las probetas fabricadas con escoria LFS1

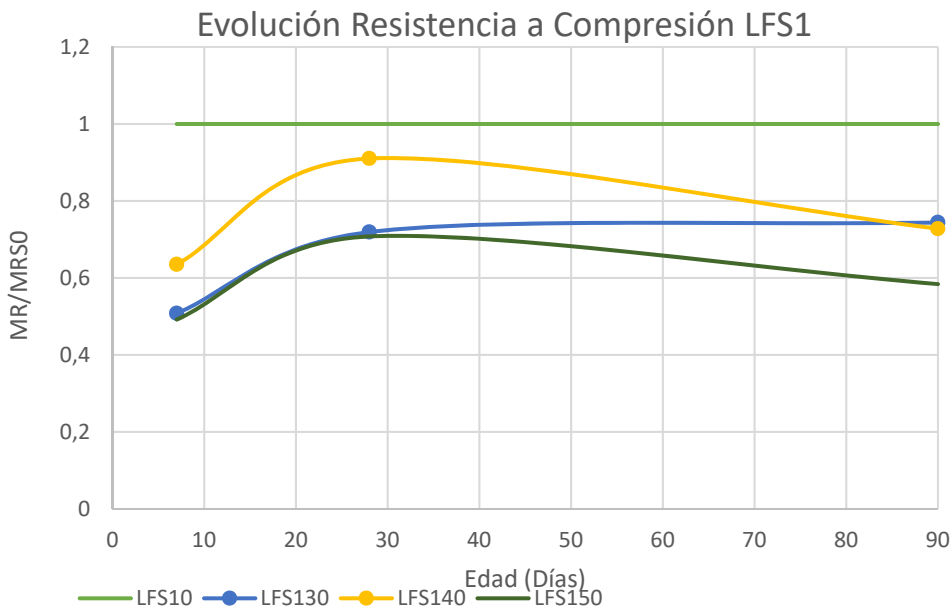


Figura 4. 23: Evolución de la resistencia a Flexión a lo largo del tiempo (MR/MRS0)

El comportamiento de la escoria LFS1 a los siete días es similar para cada porcentaje de sustitución y de aproximadamente un 30% menos que la mezcla de lechada de referencia a la misma edad. La mezcla LFS1 obtuvo una pérdida de resistencia a los 28 días para cada porcentaje de sustitución, siendo la mezcla del 40% (LFS140) la que mejor se desempeñó, seguida de la mezcla del 30% y la mezcla del 50%. Sin embargo, los resultados a los 90 días muestran una relación entre el porcentaje de sustitución y la resistencia a la compresión, siendo este último mayor a medida que disminuye el porcentaje de sustitución.

#### 4.5.2.2.3 Resultados de las probetas fabricadas con escorias LFS2

En la tabla 4.11 se muestran las medias de las roturas a compresión a 7, 28 y 90 días de las probetas fabricadas con la escoria LFS2.

	Compresión (MPa)			
	7 Días	28 Días	90 Días	% ganancia a 90 días
<b>S0</b>	6,3	8,9	12,5	0
<b>LFS230</b>	2,2	4,4	4,4	-64,68
<b>LFS240</b>	1,6	3,3	3,2	-74,67
<b>LFS250</b>	1,0	2,0	2,0	-84,19

Tabla 4. 11: Valores medios de la resistencia a compresión con escorias tipo LFS2

A continuación, en las figuras 4.24 y 4.25, se muestran de forma gráfica los valores recogidos en la tabla 4.11.

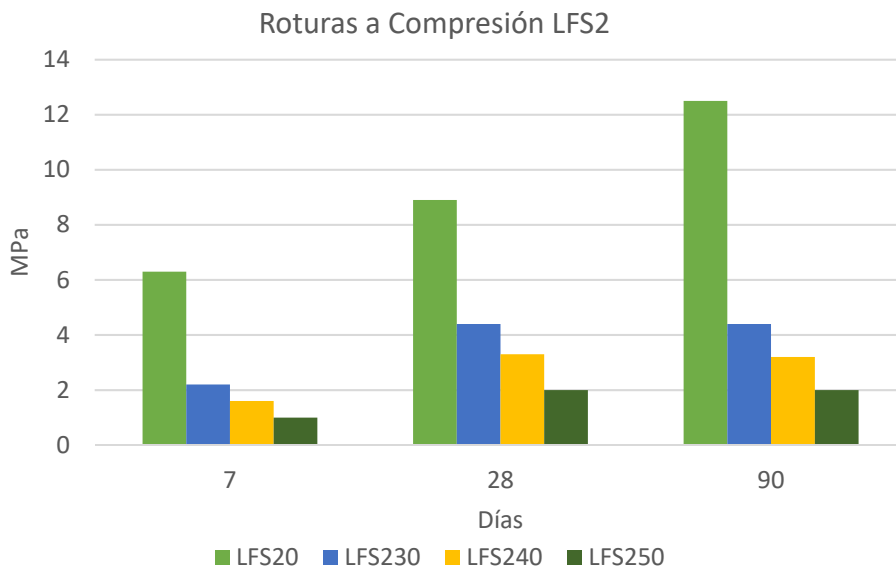


Figura 4. 24: Representación gráfica de las medias de la rotura a compresión de las probetas fabricadas con escoria LFS2

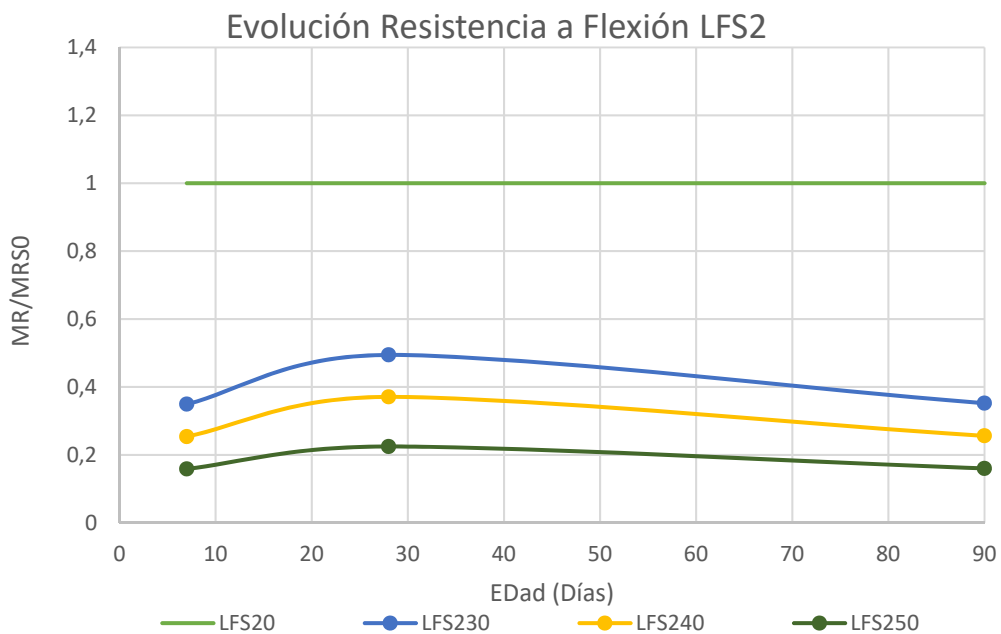


Figura 4. 25: Evolución de la resistencia a Flexión a lo largo del tiempo ( $MR/MRS_0$ )

La pérdida de resistencia a la compresión obtenida por las mezclas de LFS2, en cada etapa y sustitución porcentual, es significativa. Además, la pérdida es mayor a medida que aumenta el porcentaje de sustitución.

#### 4.5.2.2.4 Comparación entre las escorias GGBFS, LFS1 y LFS2.

En la Figura 4.26, los datos se agrupan según el tiempo y el porcentaje de sustitución para cada tipo de escoria (GGBFS, LFS1, LFS2). La figura 4.27 también permite analizar el comportamiento de cada mezcla con respecto a la referencia. Cada curva de resultados ( $R_s$ ) no está dimensionada con respecto al valor correspondiente de  $S_0$  ( $R_{sS_0}$ ).

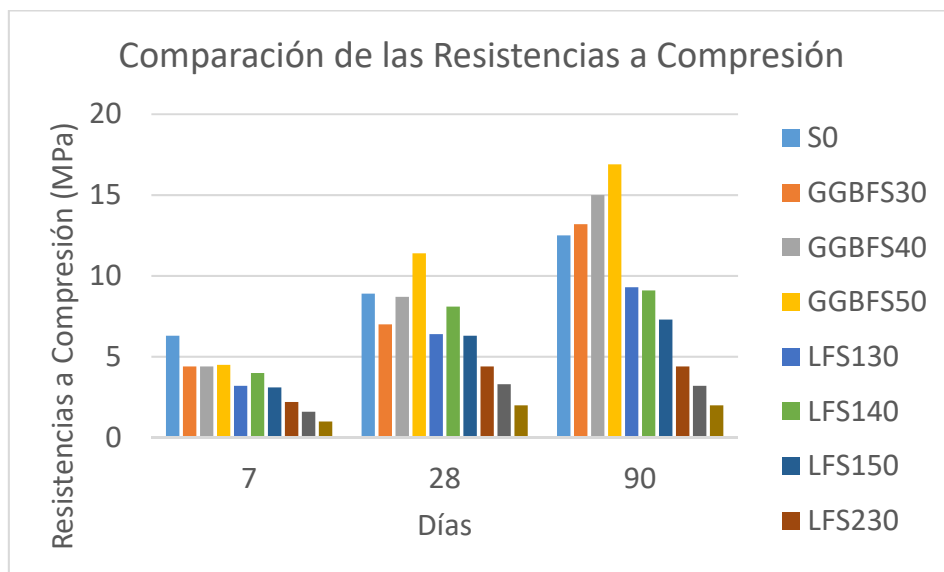


Figura 4. 26: Comparación de la resistencia a compresión de las tres escorias

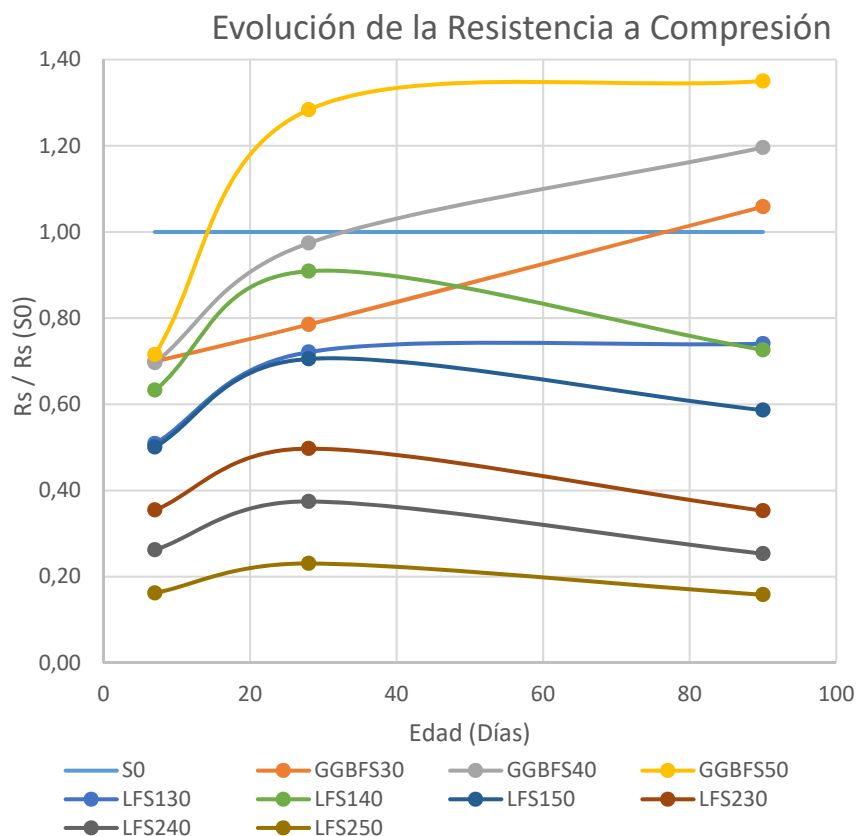


Figura 4. 27: Evolución de la resistencia a Compresión a lo largo del tiempo ( $R_s/R_{s0}$ )

La resistencia a la compresión de la escoria GGBFS crece a medida que aumenta el porcentaje de sustitución. El comportamiento de la mezcla del 40% es similar al 30%. El mejor rendimiento de compresión se puede atribuir a la mezcla del 50%, que obtuvo una ganancia de fuerza a los 28 y 90 días del 28.35% y 35%, respectivamente.

El comportamiento de la escoria LFS1 a los siete días es similar para cada porcentaje de sustitución y de aproximadamente un 30% menos que la mezcla de lechada de referencia a la misma edad. La mezcla LFS1 obtuvo una pérdida de resistencia a los 28 días para cada porcentaje de sustitución, siendo la mezcla del 40% (LFS140) la que mejor se desempeñó, seguida de la mezcla del 30% y la mezcla del 50%. Sin embargo, los resultados a los 90 días muestran una relación entre el porcentaje de sustitución y la

resistencia a la compresión, siendo este último mayor a medida que disminuye el porcentaje de sustitución.

La pérdida de resistencia a la compresión obtenida por las mezclas de LFS2, en cada etapa y sustitución porcentual, es significativa. Además, la pérdida es mayor a medida que aumenta el porcentaje de sustitución.

#### 4.6 Resumen de ideas principales

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos en la primera parte de la investigación, donde se han realizado lechadas con tres tipos de escorias (GGBFS, LFS1 y LFS2), con cemento CEM I 42,5 R y relación agua/cemento de 1/1, llegando a realizar lechadas con sustituciones de cemento por escorias en una dosis de hasta el 50%.

Se estudian los resultados para diferentes escorias blancas. Todas las muestras se han analizado en cuanto a exudación, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión para analizar la viabilidad de la mezcla para aplicaciones industriales. De acuerdo con los resultados descritos en secciones anteriores, se destacan las siguientes conclusiones:

- Las mezclas obtenidas muestran en general una mejora en factores como la fluidez y la viscosidad. Las escorias tienen una menor densidad que el cemento y causan una mezcla más fluida. Además, la lechada de cemento resultante es un material sostenible con un menor costo en comparación con las lechadas de cemento tradicionales. Esta es una mejora y, por lo tanto, un campo de aplicación en trabajos donde este factor es importante, como las aplicaciones de lechada de inyección.
- La respuesta mecánica es menos homogénea y depende en gran medida del origen de la escoria, como se esperaba. Se observan mejoras en los resultados de compresión y resistencia a la flexión para la mezcla con escorias GGBFS (10% en flexión y 35% en prueba de compresión). Sin embargo, los tipos de escoria LFS1 y

LFS2 dan lugar a mezclas con pérdidas de resistencia del 85% en compresión con respecto a la referencia. Esto se debe al menor contenido de SiO<sub>2</sub> en las escorias LFS1 y LFS2 en comparación con la escoria GGBFS.

- Se ha comprobado que existe una gran diferencia entre las escorias según su origen. No solo por su composición, sino también por el tratamiento recibido antes de la mezcla. Por lo tanto, cada generador de residuos de escoria debe estudiar la bondad de su producto en términos de su uso como sustituto de cemento. Sin embargo, las pruebas parecen indicar que un tratamiento adecuado aumenta la posible valorización de los residuos en cuestión.
- La conclusión fundamental de este primer estudio es verificar la viabilidad de obtener mezclas con sustitución de cemento por escoria. Se ha identificado una tipología de escoria (GGBFS) con un gran potencial, ya que mejora las capacidades mecánicas y de trabajo de la mezcla resultante. Las escorias LFS estudiadas en este trabajo pueden emplearse en otros tipos de trabajos donde no se requiere una alta resistencia. Por lo tanto, es una oportunidad para valorizar los residuos existentes, reducir el uso de cemento e incluso reducir el costo económico de la mezcla final, al igual que se ha visto en otros estudios realizados con el hormigón [8].

#### 4.7 Bibliografía

1. European Committee for standardization EN 445: 2001 Grout for prestressing tendons. Test methods.
2. Gopinathan, S.; Anand, K. B. Properties of cement grout modified with ultra-fine slag. *Front. Struct. Civ. Eng.* **2018**, *12*, 58–66, doi:10.1007/s11709-017-0383-0.
3. European Committee for standardization EN 447: 2009 Grout for prestressing tendons. Basic requirements.

4. European Committee for standardization EN 196-1: 2005 Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength.
5. Neville, A. M. *Properties of concrete/A.M.Neville, 4th and final edition. Harlow, Essex: Longman, 1995.*;
6. European Committee for standardization EN 12390-5:2009 Testing hardened concrete. Part 5: Flexural strength of test specimens 2000.
7. European Committee for standardization EN 196-7:2008 Methods of testing cement - Part 7: Methods of taking and preparing samples of cement.
8. Parron-Rubio, M.; Perez-García, F.; Gonzalez-Herrera, A.; Rubio-Cintas, M. Concrete Properties Comparison When Substituting a 25% Cement with Slag from Different Provenances. *Materials (Basel)*. **2018**, *11*, 1029, doi:10.3390/ma11061029.





# **CAPÍTULO 5**

## **Fabricación y comprobación de lechadas con escorias GGBFS**



## ÍNDICE

5.1 Introducción .....	133
5.2 Densidad del material.....	134
5.2.1 Proceso de elaboración.....	134
5.2.2 Resultados .....	134
5.3 Ensayo de Fluidez .....	135
5.3.1 Resultados mediante ensayo del Cono de Marsh .....	136
5.3.2 Ensayo por escurrimiento de la lechada. ....	137
5.3.2.1 Proceso de elaboración .....	137
5.3.2.2 Resultados.....	138
5.4 Ensayo de exudación.....	140
5.4.1 Resultados .....	140
5.4.1.1 Lechadas tipo A .....	140
5.4.1.2 Lechadas tipo B .....	142
5.4.1.3 Lechadas tipo C .....	143
5.4.1.4 Lechadas tipo D .....	144
5.4.1.5 Comparación entre las mezclas.....	145
5.5 Ensayo de expansividad de la escoria .....	147
5.5.1.1 Proceso de elaboración .....	148
5.5.1.2 Resultados.....	151
5.6 Comportamiento ambiental de la lechada con escoria. Lixiviado.....	152
5.6.1 Generalidades sobre la lixiviación .....	152
5.6.2 Detalles de las muestras .....	156
5.6.2 Resultados .....	157
5.7 Ensayo de Flexión .....	159
5.7.1 Resultados de las probetas tipo A .....	159
5.7.2 Resultados de las probetas tipo B.....	161
5.7.3 Resultados de las probetas tipo C.....	163

5.7.4 Resultados de las probetas tipo D.....	165
5.7.5 Comparación entre las mezclas A y B.....	167
5.7.6 Comparación entre las mezclas C y D.....	168
5.7.7 Comparación entre las mezclas A y C.....	169
5.7.8 Comparación entre las mezclas B y D.....	170
5.8 Ensayo de compresión.....	171
5.8.1 Resultados probetas tipo A.....	171
5.8.2 Resultados probetas tipo B.....	173
5.8.3 Resultados probetas tipo C.....	175
5.8.4 Resultados probetas tipo D.....	177
5.8.5 Comparación entre las mezclas A y B.....	179
5.8.6 Comparación entre las mezclas C y D.....	180
5.8.7 Comparación entre las mezclas A y C.....	181
5.8.8 Comparación entre las mezclas B y D.....	182
5.9 Resumen de ideas principales.....	183
5.10 Bibliografía.....	185

## TABLAS

<i>Tabla 5. 1: Equivalencia codificación.....</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 5. 2: Densidad media (gr/cm<sup>3</sup>) para cada tipo de mezcla.....</i>	<i>134</i>
<i>Tabla 5. 3: Fluidéz (segundos) para cada una de las lechadas.....</i>	<i>136</i>
<i>Tabla 5. 4: Ecurrimiento de cada uno de los tipos de lechadas y distintos porcentajes de sustitución.....</i>	<i>138</i>
<i>Tabla 5. 5: Valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas tipo A.....</i>	<i>140</i>
<i>Tabla 5. 6: Valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas tipo B.....</i>	<i>142</i>
<i>Tabla 5. 7: Valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas tipo C.....</i>	<i>143</i>
<i>Tabla 5. 8: Valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas tipo D.....</i>	<i>144</i>
<i>Tabla 5. 9: Resultados ensayo de Le Chatellier.....</i>	<i>151</i>
<i>Tabla 5. 10: Valores de los ensayos de lixiliados en mg/l y Mg/kg, comparando con los valores máximos admisibles de la norma UNE 14405.....</i>	<i>158</i>
<i>Tabla 5. 11: Valores medios de la Resistencia a Flexión de las mezclas tipo A.....</i>	<i>159</i>
<i>Tabla 5. 12: Valores medios de la Resistencia a Flexión de las mezclas tipo B.....</i>	<i>162</i>
<i>Tabla 5. 13: Valores medios de la Resistencia a Flexión de las mezclas tipo C.....</i>	<i>164</i>

Tabla 5. 14: Valores medios de la Resistencia a Flexión de las mezclas tipo D.....	166
Tabla 5. 15: Valores medios de la Resistencia a Compresión de las mezclas tipo A.....	172
Tabla 5. 16: Valores medios de la Resistencia a Compresión de las mezclas tipo B.....	174
Tabla 5. 17: Valores medios de la Resistencia a Compresión de las mezclas tipo C.....	176
Tabla 5. 18: Valores medios de la Resistencia a Compresión de las mezclas tipo D.....	178

## FIGURAS

Figura 5. 1: Comparativa de la densidad de las lechadas.....	135
Figura 5. 2: Fluidez (s) para cada una de las mezclas.....	136
Figura 5. 3: Preparación ensayo escurrimiento de la lechada.....	137
Figura 5. 4: Ensayo Escurrimiento de la lechada.....	138
Figura 5. 5: Ensayo de Escurrimiento para mezclas 1/1 y 0,67/1.....	139
Figura 5. 6: Representación gráfica del escurrimiento de las mezclas.....	139
Figura 5. 7: Representación gráfica de los valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas tipo A.....	141
Figura 5. 8: Representación gráfica de valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas tipo B.....	142
Figura 5. 9: Representación gráfica de valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas tipo C.....	144
Figura 5. 10: Representación gráfica de valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas tipo D.....	145
Figura 5. 11: Comparación del % hw entre las mezclas tipo A y tipo B.....	146
Figura 5. 12: Comparación del % hw entre las mezclas tipo C y tipo D.....	147
Figura 5. 13 Preparación de la pasta agua/escoria de consistencia normal.....	148
Figura 5. 14: Ensayo de consistencia de Vicat.....	149
Figura 5. 15: Preparación de la muestra en el ensayo de Le Chatelier.....	150
Figura 5. 16: Ensayo de Le Chatelier.....	151
Figura 5. 17: Probetas de lixiviado (a) Probeta antes de ser introducida en agua destilada (b) Probetas en agua destilada.....	157
Figura 5. 18 : Representación gráfica de las medias de la rotura a Flexión de las mezclas tipo A.....	160
Figura 5. 19: Evolución de la Resistencia a Flexión a lo largo del tiempo.....	161
Figura 5. 20: Representación gráfica de las medias de la rotura a Flexión de las mezclas tipo B.....	162
Figura 5. 21: Evolución de la Resistencia a Flexión a lo largo del tiempo.....	163
Figura 5. 22: Representación gráfica de las medias de la rotura a Flexión de las mezclas tipo C.....	164
Figura 5. 23: Evolución de la Resistencia a Flexión a lo largo del tiempo.....	165
Figura 5. 24: Representación gráfica de las medias de la rotura a Flexión de las mezclas tipo C.....	166
Figura 5. 25: Evolución de la Resistencia a Flexión a lo largo del tiempo.....	167
Figura 5. 26: Comparación de la evolución de resistencia a flexión mezclas A y B.....	168
Figura 5. 27: Comparación de la evolución de resistencia a flexión mezclas C y D.....	169

Figura 5. 28: Comparación de la evolución de resistencia a flexión mezclas A y C.....	170
Figura 5. 29: Comparación de la evolución de resistencia a flexión mezclas B y D.....	171
Figura 5. 30: Representación gráfica de las medias de la rotura a Compresión de las mezclas tipo A.....	172
Figura 5. 31: Evolución de la Resistencia a Compresión a lo largo del tiempo .....	173
Figura 5. 32: Representación gráfica de las medias de la rotura a Compresión de las mezclas tipo B.....	174
Figura 5. 33: Evolución de la Resistencia a Compresión a lo largo del tiempo .....	175
Figura 5. 34: Representación gráfica de las medias de la rotura a Compresión de las mezclas tipo C.....	176
Figura 5. 35: Evolución de la Resistencia a Compresión a lo largo del tiempo .....	177
Figura 5. 36: Representación gráfica de las medias de la rotura a Compresión de las mezclas tipo D.....	178
Figura 5. 37: Evolución de la Resistencia a Compresión a lo largo del tiempo .....	179
Figura 5. 38: Comparación de la evolución de resistencia a compresión mezclas A y B .....	180
Figura 5. 39: Comparación de la evolución de resistencia a compresión mezclas C y D.....	181
Figura 5. 40: Comparación de la evolución de resistencia a compresión mezclas A y C .....	182
Figura 5. 41: Comparación de la evolución de resistencia a compresión mezclas B y D .....	183

## 5.1 Introducción

Para la realización de ensayos de lechadas con escoria GGBFS, se ha diseñado una campaña de fabricación de 36 amasadas, obteniendo 9 probetas prismáticas por amasada. A cada una de ellas se le han realizado los ensayos en estado fresco. Para los ensayos mecánicos se han ejecutado roturas a 2, 4, 7, 14, 28 y 90 días, para poder determinar las curvas de endurecimiento en los primeros 28 días.

Para comenzar con la relación de ensayos, se expone la codificación utilizada para definir cada uno de los materiales que se van a fabricar. La nomenclatura se muestra en la Tabla 5.1.

Series	Id	Mezclas		
		w/c	Cemento	GGBFS (%)
A	A0	1/1	42,5	0
	A50	1/1	42,5	50
	A70	1/1	42,5	70
	A90	1/1	42,5 RS	90
B	B0	1/1	52,5 RS	0
	B50	1/1	52,5 RS	50
	B70	1/1	52,5 RS	70
	B90	1/1	52,5 RS	90
C	C0	0,67/1	42,5	0
	C50	0,67/1	42,5	50
	C70	0,67/1	42,5	70
	C90	0,67/1	42,5	90
D	D0	0,67/1	52,5 RS	0
	D50	0,67/1	52,5 RS	50
	D70	0,67/1	52,5 RS	70
	D90	0,67/1	52,5 RS	90

Tabla 5. 1: Equivalencia codificación



Una vez que se ha expuesto la codificación de las mezclas se evalúan las propiedades en estado fresco de todas las mezclas de lechada, para posteriormente evaluar las propiedades en estado endurecido.

## 5.2 Densidad del material

La densidad de la lechada es el peso por unidad de volumen, se suele expresar en  $\text{gr/cm}^3$ .

### 5.2.1 Proceso de elaboración

La densidad en estado líquido de la lechada se mide como se indica en la norma UNE-EN 445 [1]. Este ensayo mide el peso y el volumen con equipos calibrados, mediante una balanza electrónica Gibertini EU-C LCD de 0 a 7,5 Kg. Se realiza con la lechada recién mezclada, y poniendo especial hincapié en removerla para liberar el aire presente en ella para que no arroje datos erróneos. Posteriormente se deben consignar los datos del peso y el volumen obtenidos, para así determinar la densidad.

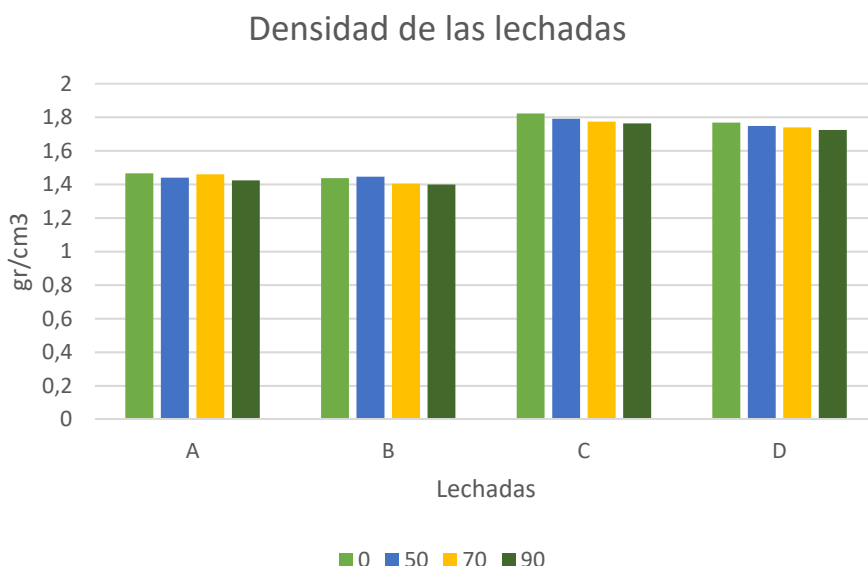
### 5.2.2 Resultados

Una vez realizado el ensayo de densidad se calcula la media para cada tipo de mezcla. Los valores obtenidos se reflejan en la Tabla 5.2.

%/ Mezclas	A	B	C	D
0	1,47	1,44	1,82	1,77
50	1,44	1,45	1,79	1,75
70	1,46	1,40	1,77	1,74
90	1,42	1,40	1,76	1,72

Tabla 5. 2: Densidad media ( $\text{gr/cm}^3$ ) para cada tipo de mezcla.

En la Figura 5.1, se muestran los valores de la Tabla 5.2, en la que se ve la densidad para cada tipo de mezcla.



*Figura 5. 1: Comparativa de la densidad de las lechadas*

Se puede observar, como la densidad de todas las mezclas de lechada con escorias en sus distintos porcentajes disminuyen con respecto a la mezcla sin escorias.

También se advierte que en las mezclas fabricadas con cemento Portland 42,5 son menos densas que las fabricadas con cemento Portland 52,5 R. Al igual, que como era de esperar, en las mezclas con relación agua cemento más baja, aumenta la densidad.

### 5.3 Ensayo de Fluidez

En este capítulo se evalúa la fluidez mediante el ensayo del cono de Marsh y el ensayo de escurrimiento de la lechada. Anteriormente se desarrolló la metodología y preparación del ensayo del cono de Marsh. Es preciso recordar que la forma de realizar el ensayo es con la lechada recién mezclada, en estado fresco, desarrollándose según la norma EN 445[1]. La norma EN 447[2], establece los requisitos aplicables al ensayo de fluidez, siendo el tiempo inmediatamente después de la mezcla menor de 25 segundos.

A cada una de las mezclas se le realizaron estos ensayos.

### 5.3.1 Resultados mediante ensayo del Cono de Marsh

Fluidez (Cono Marsh) (s)				
Mezclas	0 %	50 %	70 %	90 %
<b>A</b>	8	7,8	7,7	7,6
<b>B</b>	8	7,8	7,6	7,6
<b>C</b>	10,5	10	9,2	9,1
<b>D</b>	11,1	10,5	9,8	9,8

Tabla 5. 3: Fluidez (segundos) para cada una de las lechadas.

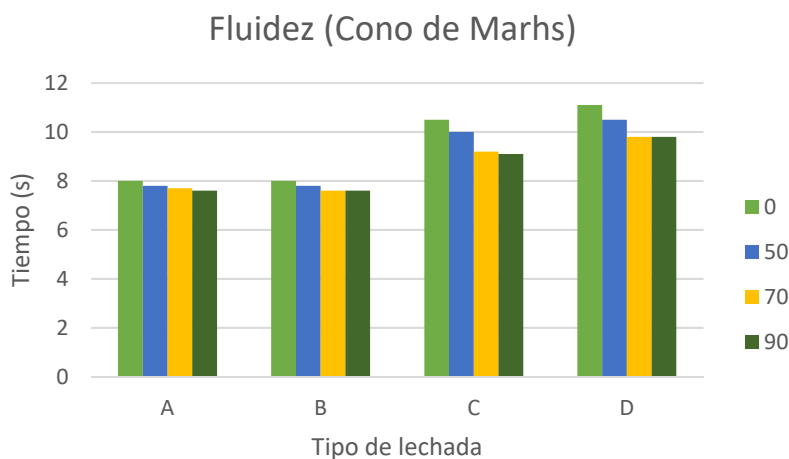


Figura 5. 2: Fluidez (s) para cada una de las mezclas

Se observa en la Figura 5.2, como la fluidez en las mezclas con distinto tipo de cemento, pero misma relación agua cemento, se comportan prácticamente de la misma forma. En función de la sustitución de escoria por cemento, aumenta la fluidez a la vez que se aumenta el porcentaje de sustitución, se observa que para las sustituciones del 70 y 90% más o menos se igualan. Por otro lado, hay un descenso más brusco de fluidez en las mezclas C y D. Es de especial interés observar que, en todas las

sustituciones de escorias, la fluidez aumenta con respecto a las mezclas fabricadas sin sustitución. Cuanto mayor es la relación agua/cemento mayor fluidez tienen las mezclas y, por otro lado, como la escoria tiene menor densidad que el cemento, cuanto más cemento se sustituye por escoria, mayor es esta también.

### 5.3.2 Ensayo por escurrimiento de la lechada.

#### 5.3.2.1 Proceso de elaboración

La prueba de escurrimiento de la lechada se ha llevado a cabo mediante la utilización de un cono de depresión pequeña de 70 mm de diámetro superior, diámetro inferior de 80 mm y altura de 40 mm tal como se expone en la norma UNE EN-445[1]. La fluidez se mide en función del diámetro del círculo que forma la lechada al esparcirse sobre una placa lisa, por un espacio de 30 segundos, Figura 5.3. La mezcla de lechada se vierte en el cono hasta que se llena completamente, se permite que la mezcla se propague, levantando el cono de asentamiento. Posteriormente se miden los diámetros de dispersión en direcciones ortogonales y se calcula el diámetro de dispersión promedio, Figura 5.4.

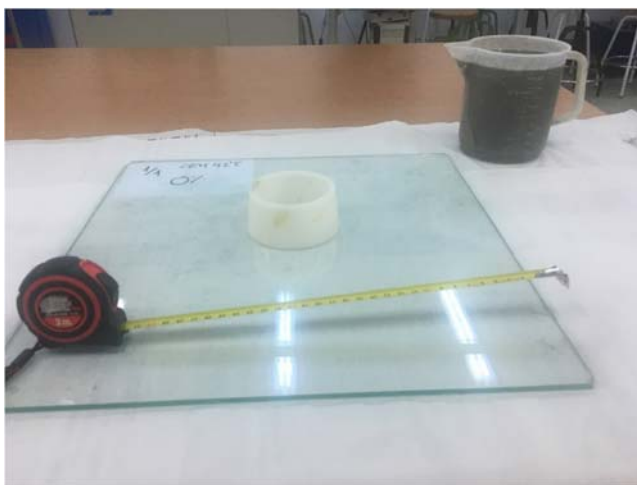


Figura 5. 3: Preparación ensayo escurrimiento de la lechada



Figura 5. 4: Ensayo Esgurrimento de la lechada

Esta norma establece como requisito básico para el ensayo por escurrimiento de la lechada que el escurrimiento medido en mm, debe ser mayor de 140 mm.

### 5.3.2.2 Resultados

A cada una de las mezclas fabricadas, se les ha realizado el ensayo de escurrimiento de la lechada y con todos estos datos, se ha calculado una media para cada tipo de mezcla, ya que los valores medios obtenidos eran prácticamente iguales, dentro de cada una de ellas. Estos valores que se han obtenido se reflejan en la Tabla 5.4.

Esgurrimento lechadas (cm)				
% Sustitución	A	B	C	D
0	27,5	30	17	14
50	29	30,5	17,5	14,5
70	31,5	32	17	16
90	32	35	17	16

Tabla 5. 4: Esgurrimento de cada uno de los tipos de lechadas y distintos porcentajes de sustitución

Se puede observar el escurrimiento de una amasada con relación agua/cemento de 0,67/1 y otra con esa relación 1/1, en las figuras a continuación mostradas (Figura 5.5).

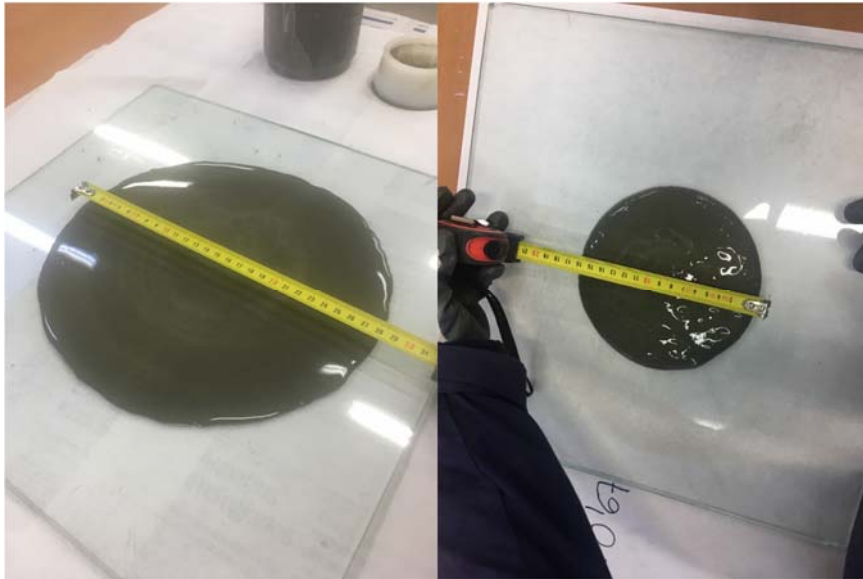


Figura 5. 5: Ensayo de Esgurrimiento para mezclas 1/1 y 0,67/1

En la Figura 5.6, se muestran los valores de la Tabla 5.4 en la que observamos la diferencia entre las consistencias de cada tipo de mezclas.

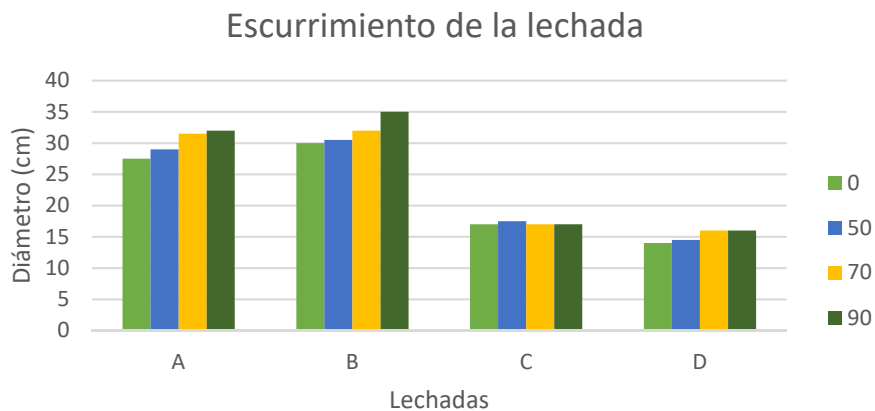


Figura 5. 6: Representación gráfica del escurrimiento de las mezclas

Se advierte como en las mezclas con relación agua cemento 1/1, mezclas A y B, el escurrimiento aumenta, con respecto a las mezclas realizadas con relación agua/cemento 0,67/1, las mezclas C y D. También conforme se aumenta el porcentaje de sustitución de escoria, aumenta la fluidez motivado por la menor densidad de la escoria con respecto al cemento, siendo el mayor aumento en la mezcla con sustitución del 90 %. Además, la mezcla B aumenta ligeramente el escurrimiento con respecto a la A, en cambio el escurrimiento en las mezclas C y D, relación agua cemento 0,67/1, se mantiene prácticamente igual, aunque el escurrimiento de las mezclas D disminuyen ligeramente. Todas las mezclas presentan una buena dispersión sin mostrar una tendencia a la separación de los constituyentes.

## 5.4 Ensayo de exudación

La metodología de este ensayo, se describe en el capítulo anterior, por lo que aquí nos centraremos en exponer los resultados obtenidos en las amasadas fabricadas en la segunda fase de la investigación.

### 5.4.1 Resultados

#### 5.4.1.1 Lechadas tipo A

En la Tabla 5.5 se muestran los resultados del porcentaje de exudación realizadas con las mezclas tipo A. Se ha realizado para cada una de las amasadas exponiendo en la tabla el valor promedio.

% agua exudada Tipo A				
Tiempo (min)	A0	A50	A70	A90
0	0	0	0	0
15	2,04	1,33	0,37	0,37
30	8,30	2,67	1,3	1,11
45	9,36	3,67	2,04	2,22
60	12,78	6,00	3,52	3,52
120	25,17	15,33	9,26	9,26
180	28,02	20,00	12,41	12,38
240	28,21	20,67	12,56	12,42

Tabla 5. 5: Valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas tipo A

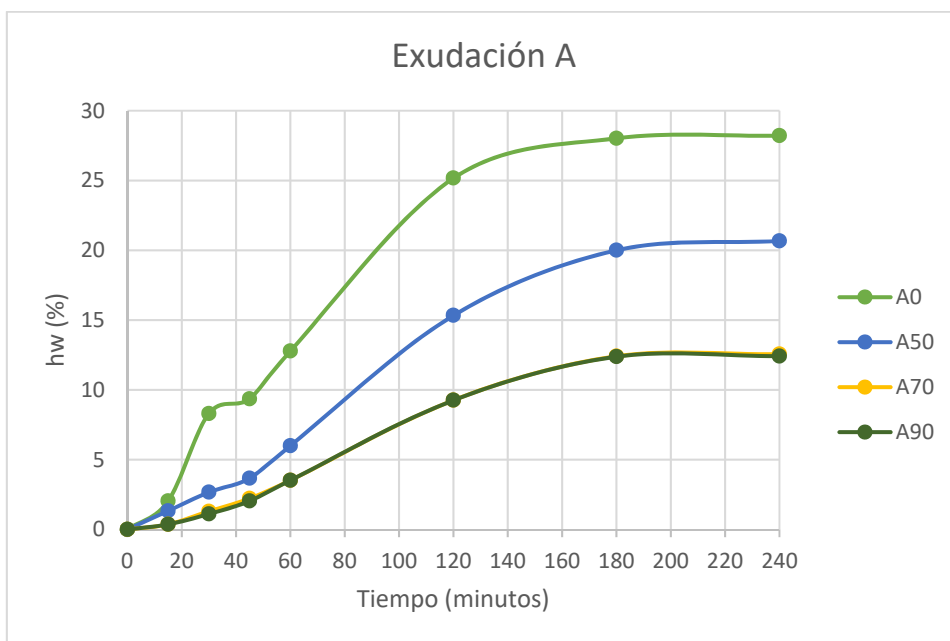


Figura 5. 7: Representación gráfica de los valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas tipo A

Se observa como la exudación en este tipo de mezcla, la mezcla de referencia, sin sustitución de escoria (A0) exuda considerablemente más desde el inicio. Las mezclas que tienen sustitución de escorias exudan menos, haciéndolo menos las que tienen el porcentaje de sustitución mayor, igualándose prácticamente en el porcentaje del 70 y 90%. A los 180 minutos se estabiliza la exudación para todas las mezclas. Comportamiento previsto conforme a lo sucedido en el capítulo 4 con este tipo de escoria (GGBFS), misma relación agua/cemento y cemento Portland 42,5.



### 5.4.1.2 Lechadas tipo B

Al igual que en las mezclas anteriores, en la Tabla 5.6 se muestran los resultados de los valores medios de los porcentajes de agua exudada en las mezclas tipo B.

% agua exudada Tipo B				
Tiempo (min)	B0	B50	B70	B90
0	0	0	0	0
15	1,93	0,93	0,45	0,43
30	5,4	2,22	1,46	1,32
45	8,12	3,46	2,36	2,27
60	11,56	5,68	3,36	3,36
120	25,56	14,34	8,97	8,54
180	25,93	20	13,88	12,46
240	25,94	20	13,91	12,46

Tabla 5. 6: Valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas tipo B

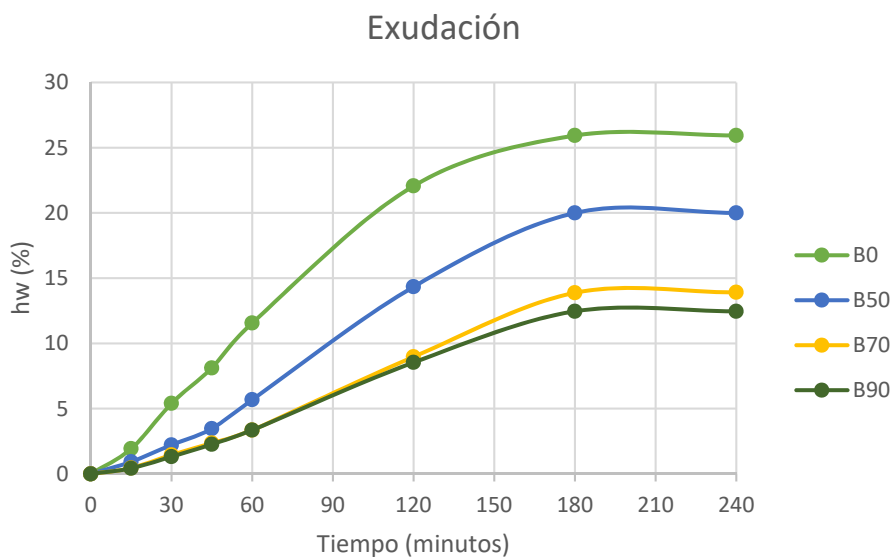


Figura 5. 8: Representación gráfica de valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas tipo B

Casi desde el inicio, sucede lo mismo que con las mezclas B, aunque parece que a partir de los 120 minutos la exudación de la mezcla de referencia, sin porcentaje de sustitución (B0) se estabiliza, mientras que el comportamiento de las mezclas con porcentajes de sustitución se comportan igual que las mezclas tipo A, disminuyendo el porcentaje de agua exudada conforme aumenta el porcentaje de sustitución de escoria.

#### 5.4.1.3 Lechadas tipo C

Al igual que con las mezclas anteriores, en la Tabla 5.7, se muestran los resultados de los valores medios de los porcentajes de agua exudada en las mezclas tipo C.

agua exudada Tipo C				
Tiempo (min)	C0	C50	C70	C90
0	0	0	0	0
15	0,19	0	0	0
30	0,37	0,19	0,19	0,19
45	0,56	0,46	0,37	0,37
60	0,56	0,49	0,39	0,37
120	1,3	0,51	0,39	0,39
180	1,67	0,55	0,43	0,39
240	1,67	0,55	0,43	0,39

Tabla 5. 7: Valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas tipo C

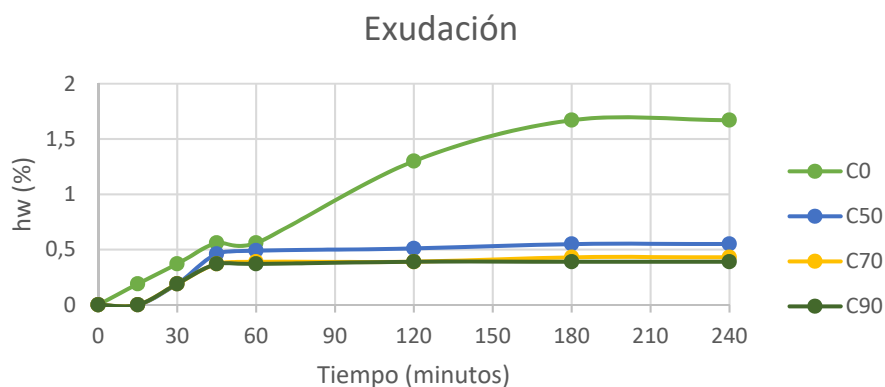


Figura 5. 9: Representación gráfica de valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas tipo C

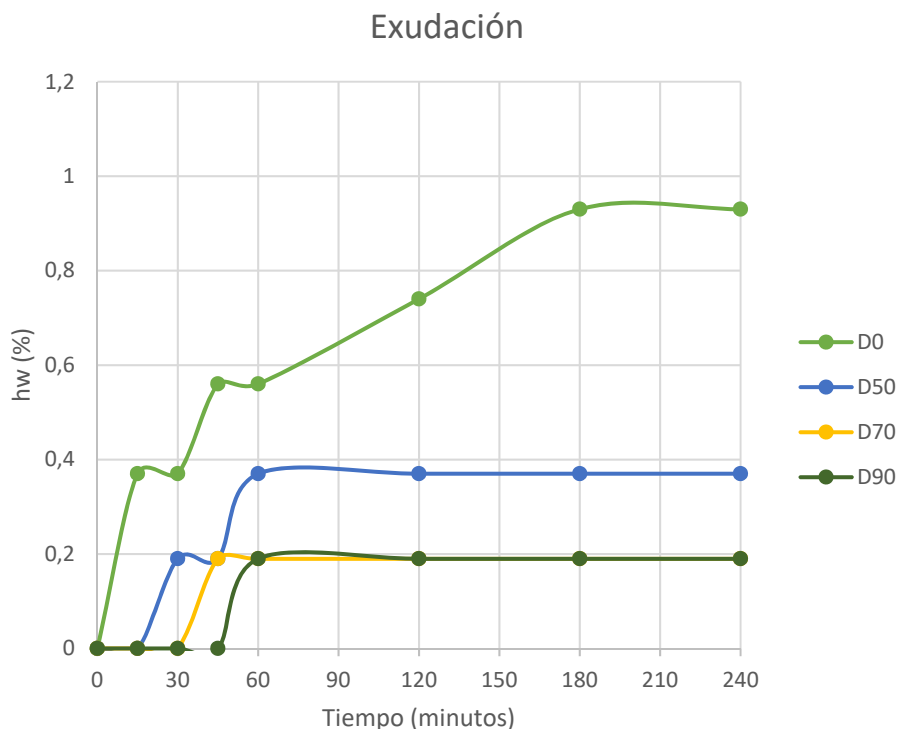
Con este tipo de mezcla se pone de manifiesto como la exudación disminuye considerablemente en función de la relación agua cemento utilizada. En este gráfico lo más significativo es que la exudación en las mezclas con sustitución de escorias es mucho menor que en la que no tiene sustitución, a lo largo de todo el ensayo.

#### 5.4.1.4 Lechadas tipo D

En la Tabla 5.8 se muestran los resultados del porcentaje de exudación realizadas con las mezclas tipo D.

% hw exudada Tipo D				
Tiempo (min)	D0	D50	D70	D90
0	0	0	0	0
15	0,37	0	0	0
30	0,37	0,19	0	0
45	0,56	0,19	0,19	0
60	0,56	0,37	0,19	0,19
120	0,74	0,37	0,19	0,19
180	0,93	0,37	0,19	0,19
240	0,93	0,37	0,19	0,19

Tabla 5. 8: Valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas tipo D



*Figura 5. 10: Representación gráfica de valores medios de los porcentajes de Exudación de las Lechadas tipo D*

En esta mezcla el comportamiento es similar a las mezclas del tipo C, sigue siendo el porcentaje de agua exudada mayor en aquella mezcla que no tiene sustitución de escoria (D0) y la exudación va siendo menor cuanto más aumenta el porcentaje de sustitución de escoria.

#### 5.4.1.5 Comparación entre las mezclas

Por un lado, se va a realizar una comparativa entre las mezclas fabricadas con la misma relación agua/cemento y distinto tipo de cemento utilizado. En la Figura 5.11 se representa gráficamente la comparación entre las mezclas fabricadas con la relación agua/cemento 1/1, Mezclas A y B.

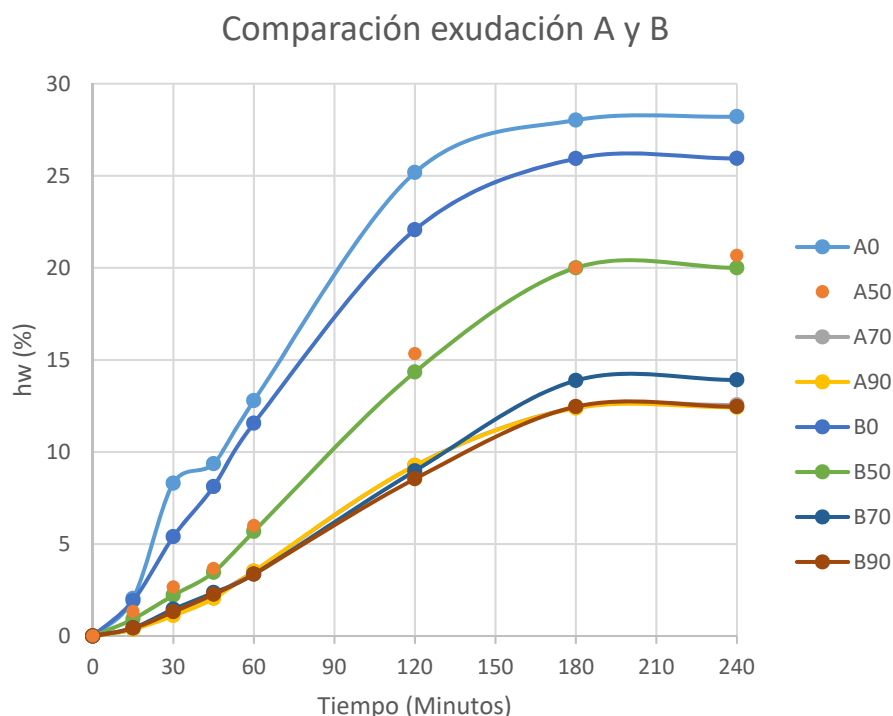


Figura 5. 11: Comparación del % hw entre las mezclas tipo A y tipo B

Como se observa el comportamiento de las mezclas de referencia, sin sustitución de escorias, A y B, son las que más exudan yendo de la mano hasta los 130 minutos dónde la mezcla tipo B estabiliza su exudación incluso disminuyéndola. Esto se debe a que la superficie específica del cemento es considerablemente menor a la de la escoria. Por otro lado, las mezclas con el mismo porcentaje de sustitución (50%), se comportan prácticamente igual, disminuyendo su porcentaje de agua exudada con respecto a las mezclas de referencia. Por último, las mezclas con el 70 y 90 % de sustitución se equiparan. Todas ellas exudan conforme al aumento de tiempo. Cuanto mayor es el porcentaje de sustitución de escoria menor es la exudación debido a la hidratación de la escoria que tiene mayor superficie específica. A partir de los 180 minutos la exudación se estabiliza en todas las mezclas.

En la Figura 5.12 se representa gráficamente la comparación entre las mezclas fabricadas con la relación agua/cemento 0,67/1, Mezclas C y D.

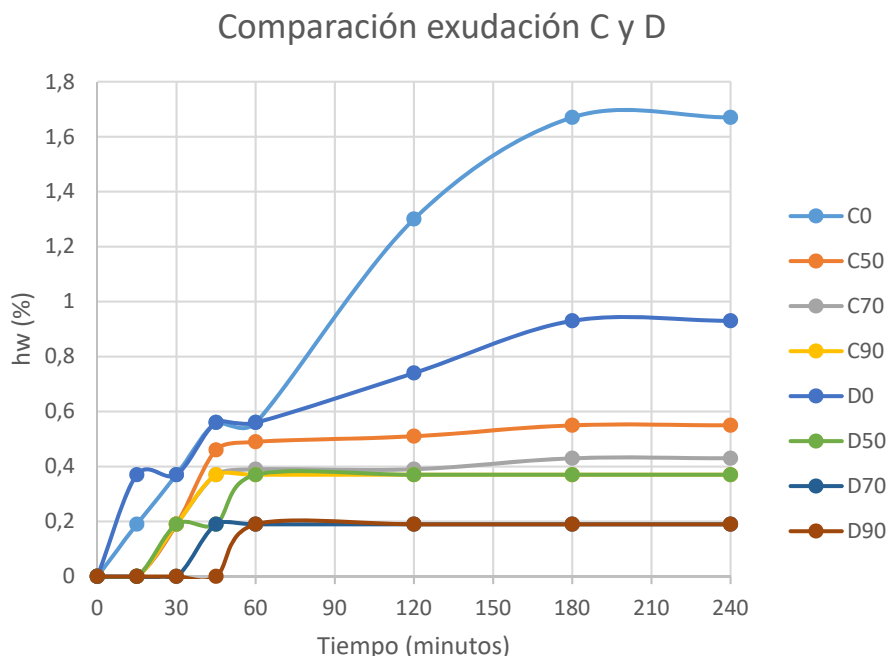


Figura 5. 12: Comparación del % hw entre las mezclas tipo C y tipo D

Sucede lo mismo que en el caso anterior, y evidentemente como la relación agua /cemento es menor, la exudación que se produce es menor.

## 5.5 Ensayo de expansividad de la escoria

### 5.5.1 Introducción

En esta tesis se ha utilizado el método de la estabilidad de volumen del cemento para la conocer la expansividad de la escoria, siguiendo el método descrito en la norma EN 196-3 [3], se ha considerado el más adecuado ya que la sustitución que hacemos de la escoria es por cemento.

La estabilidad volumétrica se determina observando la expansión volumétrica de la pasta de cemento/escoria de consistencia normal.

### 5.5.1.1 Proceso de elaboración

Se prepara una pasta de escoria de consistencia normal. Se transfiere la pasta inmediatamente al molde ligeramente engrasado, colocado previamente sobre una placa base, ligeramente engrasada y se llena hasta rebosar sin compactación ni vibración excesiva. Se eliminan los huecos de la pasta mediante una serie de ligeros golpecitos con la palma de la mano sobre el molde. Se quita el exceso de pasta con un movimiento de serrado suave con un utensilio de borde recto, de manera que la pasta llene completamente el molde y tenga una superficie superior lisa. Para la obtención de la consistencia normal se utiliza el aparato de Vicat provisto de la adecuada sonda.



*Figura 5. 13 Preparación de la pasta agua/escoria de consistencia normal*

Inmediatamente después de engrasar la pasta, se coloca el molde y la placa base en el aparato de Vicat, situándolos centrados debajo de la sonda. Se baja la sonda suavemente hasta que entre en contacto con la pasta. Se espera entre 1 s y 2 s en esa posición, con el fin de evitar una velocidad inicial o aceleración forzada de las partes móviles. Se sueltan rápidamente las partes móviles y la sonda debe penetrar, entonces, verticalmente en el centro de la pasta.

La liberación de la sonda se debe realizar  $4 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$  después del tiempo de referencia cero. Se lee la escala al menos 5 s tras el fin de la penetración o 30 s después de la liberación de la sonda, lo que ocurra primero. Se anota la lectura de la escala, que indica la distancia entre la cara inferior de la

sonda y la placa base, junto con el contenido de agua de la pasta expresada en tanto por ciento de la masa de cemento. Se limpia la sonda inmediatamente después de cada penetración. Se repite el ensayo con pastas con diferentes contenidos de agua, hasta encontrar una que produzca una distancia de  $(6 \pm 2)$  mm entre la sonda y la placa base.



Figura 5. 14: Ensayo de consistencia de Vicat

Una vez hemos obtenido la consistencia normal de la pasta se procede a la elaboración del ensayo de expansividad, se coloca el molde de Le Chatelier ligeramente engrasado sobre la placa base, también ligeramente engrasada, y se llena inmediatamente, sin compactación o vibración indebidas, usando sólo las manos y una herramienta de borde recto, si se desea, para enrasar la superficie superior.





Figura 5. 15: Preparación de la muestra en el ensayo de Le Chatelier

Se cubre el molde con la placa de cubierta ligeramente engrasada, se añade el peso adicional si fuera necesario, e inmediatamente se coloca el aparato completo en el armario o cámara húmeda. Se mantiene durante  $24 \text{ h} \pm 30 \text{ min}$  a  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$  y a una humedad relativa mínima del 90%. También el molde se podría colocar entre sus placas, con la masa adicional, si fuera necesaria, en un baño de agua y mantenerlas sumergidas durante  $24 \text{ h} \pm 30 \text{ min}$  a  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ , siempre que este procedimiento se haya calibrado frente al método de referencia.

- Medida de la distancia (A): Al final del período de  $24 \text{ h} \pm 30 \text{ min}$ , se mide la distancia (A) entre las puntas de las agujas, con aproximación de 0,5 mm. Se calienta entonces el molde gradualmente hasta ebullición durante  $30 \pm 5 \text{ min}$  y se mantiene el baño a la temperatura de ebullición durante  $3 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$ .
- Medida de la distancia (B): Al término del período de ebullición, se puede medir la distancia (B) entre las puntas de las agujas, con una aproximación de 0,5 mm.
- Medida de la distancia (C): Se sacan las probetas del calor, y se dejan enfriar a la temperatura del laboratorio. Se mide la distancia (C) entre las puntas de las agujas, con una aproximación de 0,5 mm. Se anotan las medidas A y C, y se calcula la diferencia (C-A), al milímetro más próximo. Si la expansión excede del límite de especificación para el cemento, se debe llevar a cabo una repetición. Se anota el valor (C-A), o la media de los dos valores

cuando el ensayo se haya hecho por duplicado, al milímetro más próximo.



Figura 5. 16: Ensayo de Le Chatellier

### 5.5.1.2 Resultados

En la Tabla 5.10 se reflejan los datos obtenidos en el ensayo de Le Chatellier, en cada una de sus fases, A, B y C.

	Cemento A	Cemento B	Cemento C	C-A (Cemento)	GGBFS A	GGBFS B	GGBFS C	C-A (GGBFS)
<b>Probeta 1</b>	7	8,2	9	<b>2</b>	7	7,5	7,5	<b>0,5</b>
<b>Probeta 2</b>	10	12,4	13	<b>3</b>	8	8,5	8,5	<b>0,5</b>

Tabla 5. 9: Resultados ensayo de Le Chatellier

Se observa como el cemento expande 2 y 3 mm, mientras que la escoria 0,5 mm, luego las escorias expanden menos que el cemento.

## 5.6 Comportamiento ambiental de la lechada con escoria. Lixiviado

Cuando nos planteamos la posible utilización de un residuo, no sólo nos podemos dejar llevar por la evaluación de que las propiedades que exigimos en él superen nuestras expectativas para su nueva empleabilidad, por ejemplo, en este caso, que tengan buenas propiedades mecánicas y físicas, un punto fundamental a tener en cuenta es que no contamine desde el punto de vista medioambiental más que el producto original.

Cuando los materiales sólidos entran en contacto con un líquido, algunos de sus componentes pueden disolverse en menor o mayor extensión, siendo de interés el grado de disolución para cada constituyente individual. La lixiviación de los materiales puede ocurrir en el lugar en que está aplicado, por infiltración natural de aguas, por lluvias, exposición a agua de mar, etc. En este apartado se ven los principios generales de la lixiviación, los ensayos realizados a las probetas y los resultados obtenidos de los mismos.

En este caso se han analizado las lechadas con cemento 52,5 sin sustitución de escorias y las lechadas con sustitución del 70%. También se evalúa el agua de exudación para estos dos casos.

### 5.6.1 Generalidades sobre la lixiviación

Existe un gran número de factores que influyen en la relación en que los constituyentes de un material son disueltos del material matriz. Según el profesor Van der Sloot [4] estos factores pueden ser divididos en físicos y químicos.

Los factores físicos que influyen en la lixiviación son:

- Tamaño de partícula, que está, en parte, relacionada con la superficie expuesta a lixiviación.
- Homogeneidad o heterogeneidad de la matriz sólida en términos de fases minerales.
- Tiempo de exposición.
- Flujo del lixivante.

- Temperatura.
- Porosidad de la matriz.
- Forma geométrica y tamaño del material, cuando la lixiviación es controlada predominantemente por difusión.
- Permeabilidad de la matriz.
- Condiciones hidrogeológicas.

Los factores químicos que influyen en la lixiviación contienen:

- Equilibrio o control de la velocidad de salida del elemento.
- Potencial de lixivación de los constituyentes.
- El pH, del material o impuesto por el ambiente.
- Condiciones redox, del material o impuesto por el ambiente.
- Procesos de adsorción.
- Factores biológicos capaces de afectar al pH o al redox.

Teniendo en cuenta la peligrosidad ambiental, diferentes normativas proponen ensayos de lixiviación para clasificar el residuo o la matriz que contiene el residuo. A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de lixiviación, se desarrolla la investigación de las posibilidades de utilización del mismo. Así, cuando el residuo presenta contenidos elevados de iones en la extracción de una sustancia absorbida desde el lecho poroso, la investigación se debe centrar en estabilizar o solidificar el residuo, que son procesos que pueden ser descritos como tecnologías que consisten en inmovilizar, aislar o confinar un contaminante, generalmente inorgánico, en una matriz rígida y compacta. Por el contrario, cuando el residuo no presenta un alto contenido de iones de lixiviado de la muestra, el estudio se puede dirigir directamente al desarrollo del producto mercantil.

Actualmente existen varias legislaciones en la normativa Europea en las que se encuentran IV.39/9.34 2000/532/CE, por la que se establece una lista de residuos peligrosos. Según la normativa española, se consideran peligrosos aquellos que aparecen en el anexo 2 del Real Decreto 952/1997, de 20 de junio, donde aparece el listado de residuos peligrosos aprobado por la Decisión 94/904/CE, del consejo, de 22 de diciembre, de acuerdo con el apartado 4 del artículo 1 de la directiva 91/689/CEE.

Una de las opciones para reducir la solubilidad de los metales pesados presentes en las escorias es la realización de algún tipo de tratamiento antes de depositarlo en vertederos o de su reutilización.

Estos tratamientos se pueden clasificar en (DIN 38414) [5]:

**Estabilización:** Tratamiento del residuo con agentes químicos para reducir la movilidad de los componentes, tales como, cal o fosfórico. La cal actúa manteniendo el pH del posible “extractante” (agua de lluvia) dentro de un rango donde la solubilidad del plomo y el cadmio son mínimas. La ventaja que presenta es la capacidad de formar precipitados insolubles con muchos metales multivalentes. La adición de ácido fosfórico da lugar a la precipitación del plomo en forma de fosfato.

**Solidificación.** Consiste en confinar en una matriz de baja permeabilidad. En este caso se pretenden mejorar las propiedades mecánicas y disminuir la superficie de contacto de los residuos con el posible agente “lixiviante”. Este proceso no implica una interacción química, sino una unión de tipo mecánico a la matriz.

**Vitrificación:** Tratamiento a elevada temperatura que tiene por objeto fundir las cenizas y generar vidrio. Las temperaturas que se deben alcanzan son de unos 1500°C, lo que hace que sea un tratamiento muy caro.

**Extracción química.** Tratamiento que consiste en lavar los metales contenidos en las cenizas con diferentes extractos líquidos.

Los tratamientos generalmente utilizados son de estabilización/solidificación, que combinan la interacción química y mejoran las propiedades del residuo. Los objetivos de estos procesos son mejorar las propiedades físicas del material, aumentar el tamaño de las partículas para reducir la interacción con el agua, obtener sólidos sin agua libre, mejorar las características de manejo y reducir la movilidad de contaminantes.

Este tipo de tratamientos está enfocado a la inmovilización de metales, ya que las moléculas orgánicas no se incorporan fácilmente a estructuras cristalinas y es más difícil que formen precipitados insolubles. Los

procesos de estabilización y solidificación son muy utilizados en la gestión de residuos peligrosos.

Los diferentes sistemas de estabilización/solidificación se pueden clasificar en orgánicos e inorgánicos según los reactivos utilizados en el proceso. Los más utilizados son los inorgánicos basados en la utilización de cemento, silicatos, arcilla, cal, etc.

Cuando se ha tratado el residuo se debe evaluar la eficiencia del proceso de inertización, analizando el residuo sin tratar y tratado mediante análisis químicos, o los llamados test de lixiviado, que consisten en poner en contacto la muestra con un agente “lixivante” durante un determinado periodo de tiempo. De esta forma se puede comparar el contenido total del residuo con el de la matriz “inertizada” y lo que realmente se libera en contacto con el agente “extractante”.

El test de lixiviación se utiliza para simular situaciones de campo, aunque los resultados obtenidos no sean extrapolables directamente, si permiten identificar los elementos “lixiviables”, verificar la eficiencia de un determinado tratamiento y estimar el posible impacto del residuo a depositar.

En base a estos datos, nos centraremos en el estudio del residuo en hormigones, para asegurar la estabilización de los metales pesados en la matriz de cemento e identificar la migración de los elementos a largo plazo. Nos referiremos a la norma EN 12920:2007 [6] Se han aplicado los diferentes procesos y pasos a seguir según esta normativa.

Esta norma proporciona una metodología para determinar el comportamiento de lixiviación de un residuo bajo condiciones específicas, es decir, en un escenario de solidificación/estabilización dentro de un marco de tiempo específico, en nuestro caso correspondiente a 100 años. Se efectuará una selección de ensayos dependiendo del problema y el escenario a evaluar.

Se ha realizado un análisis de lixiviado de la mezcla fabricada con cemento 52,5 R sin sustitución de escoria y de la mezcla fabricada con un 70% de sustitución, ya que es la mezcla óptima según toda la investigación. En este ensayo se ha aprovechado el agua exudada de estas mezclas para también ver la lixiviación, ya que cuando se produzcan las inyecciones con este material y hasta el tiempo de fraguado poder evaluarla también su incidencia.

Este ensayo se lleva a cabo en el laboratorio de los Servicios Centrales de Investigación Científica y Tecnológica de la Universidad de Cádiz, en la división de Espectroscopia.

EL instrumental utilizado ha sido Espectrómetro ICP-MS modelo X serie 2 de Thermo Elemental.

### 5.6.2 Detalles de las muestras

Se rompen las probetas para introducirlas en 1 litro de agua destilada en las condiciones más desfavorables. Estuvieron sumergidas durante 48 h y se mandaron a analizar a la Universidad de Cádiz, al laboratorio de División de Espectroscopía, en tarros esterilizados, Figura 5.17. El tratamiento que se le realizó a la muestra de agua en el laboratorio fue, filtrar la muestra con  $0.45\ \mu\text{m}$  y acidificarlas a  $\text{pH} < 2$  con ácido nítrico ultrapuro. Una vez realizado este proceso se introdujo en el espectrómetro. También se envió al laboratorio, como se ha mencionado anteriormente el agua exudada en el ensayo de exudación.



Figura 5. 17: Probetas de lixiviado (a) Probeta antes de ser introducida en agua destilada (b) Probetas en agua destilada

### 5.6.2 Resultados

En la Tabla 5.10 se refleja el resultado de lixiviación expresado como el valor medio de tres medidas instrumentales, Se reflejan los valores medios de lixiviado en mg/l y mg/kg haciendo una comparación con los valores máximos admisibles de la norma EN-14405 [7].



ELEMENTOS	Agua exudación 0% (mg/l)	Agua exudación 70% (mg/l)	Lechada 52,5 - 0% (mg/l)	Lechada 52,5 - 0% (mg/kg)	Lechada 52,5 - 70% (mg/l)	Lechada 52,5 - 70% (mg/kg)	Valores máximos permitidos Norma EN- 14405 (mg/kg)	Ensayo de percolación mg/l
Peso de la muestra (kg)			0,35		0,35			
[Na] mg/l	680	336	11,6	33,1429	4,51	12,8857	-	-
[K] mg/l	5780	2872	47,8	136,5714	20,2	57,7143	-	-
[Ca] mg/l	571	805	185	528,5714	4,73	13,5143	-	-
[Mg] mg/l	0,014	0,021	0,0202	0,0577	0,076	0,2171	-	-
[Al] mg/l	0,001	0,0029	0,17	0,4857	0,703	2,0086	-	-
[Si] mg/l	0,013	0,011	0,0086	0,0246	0,044	0,1257	-	-
[Ti] mg/l	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	-	< 0,0001	-	-	-
[Cr] mg/l	1,23	0,853	0,015	0,0429	0,00016	0,0005	0,5	0,1
[Mn] mg/l	0,0001	0,0003	0,0001	0,0003	0,00068	0,0019	-	-
[Fe] mg/l	0,001	0,0023	0,0182	0,0520	0,006	0,0171	-	-
[Ni] mg/l	0,000029	0,00017	0,000027	0,0008	0,000174	0,0005	0,4	0,12
[Cu] mg/l	0,00413	0,0031	0,00192	0,0055	0,0045	0,0129	2	0,6
[Zn] mg/l	0,0021	0,00089	0,0066	0,0189	0,000694	0,0020	4	1,2
[As] mg/l	0,000541	0,00039	< 0,0002	-	0,00033	0,0009	2	0,06
[Cd] mg/l	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	-	< 0,0001	-	1	0,02
[Sn] mg/l	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	-	< 0,0001	-	-	-
[Pb] mg/l	0,0082	0,002	0,000543	0,0016	< 0,0001	-	0,5	0,15

Tabla 5. 10: Valores de los ensayos de lixiviados en mg/l y Mg/kg, comparando con los valores máximos admisibles de la norma UNE 14405

Se observa que, en los elementos químicos estudiados, todos en las mezclas con sustitución de escorias disminuyen con respecto a la lechada convencional. En las muestras realizadas en mg/kg, todas están por debajo de los valores admitidos por la norma, sin embargo, en las muestras realizadas en mg/l, todos los valores están por debajo del valor de la norma excepto el Cr que en el caso de la mezcla de sustitución de escoria obtiene 0,853 mg/l y en la lechada de cemento sin sustitución (convencional) se obtiene 1,23 mg/l, estando los dos casos por encima del valor permitido por la norma que es de 0,1 mg/l. Lo interesante es que la mezcla con sustitución de escoria, aun así, está bastante por debajo de la mezcla sin sustitución. Estos valores, intentando que las mezclas exuden mucho menos no tendrán repercusión.

## 5.7 Ensayo de Flexión

### 5.7.1 Resultados de las probetas tipo A

En la Tabla 5.11 se detallan los resultados medios de la rotura a flexión de las probetas tipo A, mezclas compuestas por cemento CEM I 42,5 y relación agua/cemento 1/1, teniendo como referencia la A0 (sin sustitución) y las distintas mezclas con los distintos porcentajes de sustitución de escoria GGBFS (A50, A70, A90). Se observa, a su vez, la ganancia de resistencia a 90 días de las mezclas con escorias, A50, A70 y A90, con respecto a la mezcla sin escoria A0.

Resistencias a Flexión A (MPa)							
Días	2	4	7	14	28	90	% de ganancia a 90 días
0A	1,61	2,11	2,45	2,86	3,35	3,92	0,0%
50A	0,94	1,39	1,65	2,41	3,46	4,63	18,1%
70A	0,69	1,57	2,22	2,55	3,34	4,72	20,41%
90A	0,44	0,98	1,44	2,03	2,94	4,05	3,32%

Tabla 5. 11: Valores medios de la Resistencia a Flexión de las mezclas tipo A

A continuación, se muestra la Figura 5.18 donde se representa de manera gráfica los resultados de la Tabla 5.12, en la cual se aprecia perfectamente la evolución de las resistencias para cada una de las roturas. Con diagrama de barras, los datos se agrupan según el tiempo y los porcentajes de sustitución realizados. La Figura 5.19 representa la evolución de resistencia con respecto a la mezcla de referencia (A0) de forma adimensional.

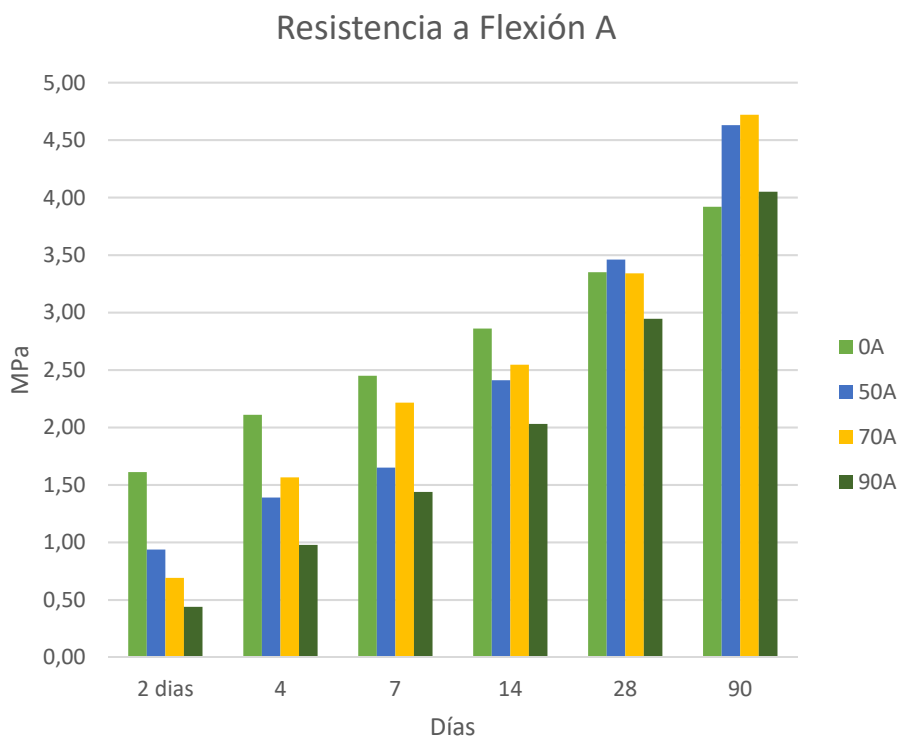


Figura 5. 18 : Representación gráfica de las medias de la rotura a Flexión de las mezclas tipo A

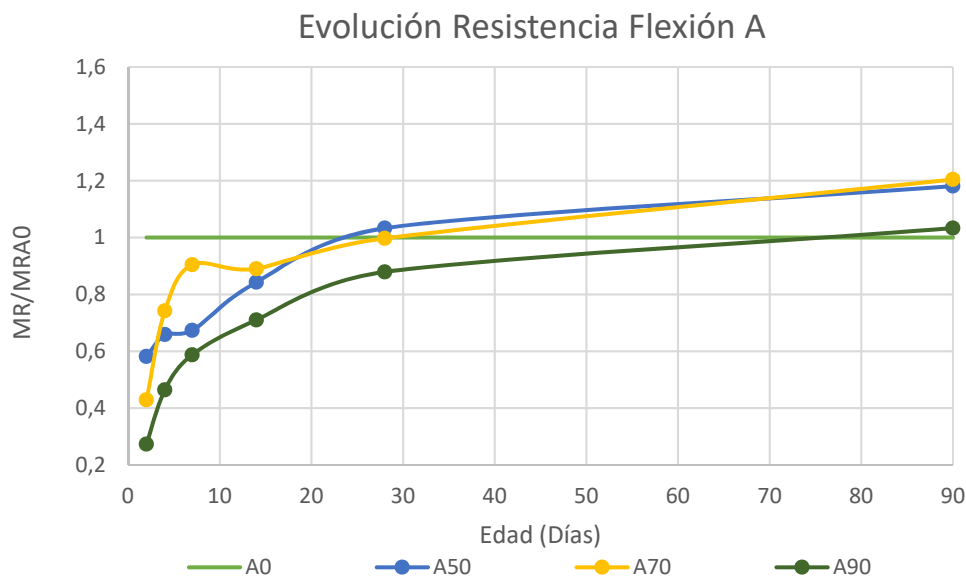


Figura 5. 19: Evolución de la Resistencia a Flexión a lo largo del tiempo

En los primeros días de fraguado, ninguna de las mezclas con sustitución de escorias logra alcanzar la resistencia a flexión de la mezcla de referencia A0, siendo la A70 la que aumenta en mayor medida, aunque se estanca su evolución igualándose a las A50 y A90 hasta los 28 días, a partir de aquí las mezclas A50 y A70 superan la resistencia, pero es a los 90 días cuando se dispara la resistencia llegando a alcanzar la mezcla A70 un 20,41% de ganancia con respecto a la mezcla A0. La mezcla A90 no llega a adquirir la resistencia de la mezcla de referencia A0, hasta aproximadamente los 70 días, dónde más o menos se equiparan hasta los 90 días.

### 5.7.2 Resultados de las probetas tipo B

A continuación, en la Tabla 5.12 se muestran los resultados medios de la rotura a flexión de las probetas tipo B, mezclas compuestas por cemento CEM I 52,5 R y relación agua/cemento 1/1, teniendo como mezcla de

referencia la B0 (sin sustitución) y las distintas mezclas con los distintos porcentajes de sustitución de escoria GGBFS (B50, B70, B90).

Resistencia a Flexión B (MPa)							
Días	2	4	7	14	28	90	% ganancia a 90 días
<b>0B</b>	2,68	3,14	3,51	4,78	5,21	5,46	0,00%
<b>50B</b>	0,96	1,96	2,94	3,89	4,35	5,98	9,59%
<b>70B</b>	0,78	1,75	2,67	4,01	4,96	6,20	13,62%
<b>90B</b>	0,51	1,36	2,16	3,55	3,28	6,12	12,15%

Tabla 5. 12: Valores medios de la Resistencia a Flexión de las mezclas tipo B

Al igual que en el apartado anterior, a continuación, se muestran las Figuras 5.20 y 5.21 donde se representan de manera gráfica los resultados de la Tabla 5.13, en las cuales se aprecian perfectamente la evolución de las resistencias a flexión para cada una de las roturas. En la Figura 5.20 los datos se agrupan según el tiempo y los porcentajes de sustitución realizados. La Figura 5.21 también permite analizar el comportamiento de cada mezcla con respecto a la mezcla de referencia. Cada curva de resultados MR no está dimensionada con respecto al valor correspondiente de B0 ( $MR_{B0}$ ).

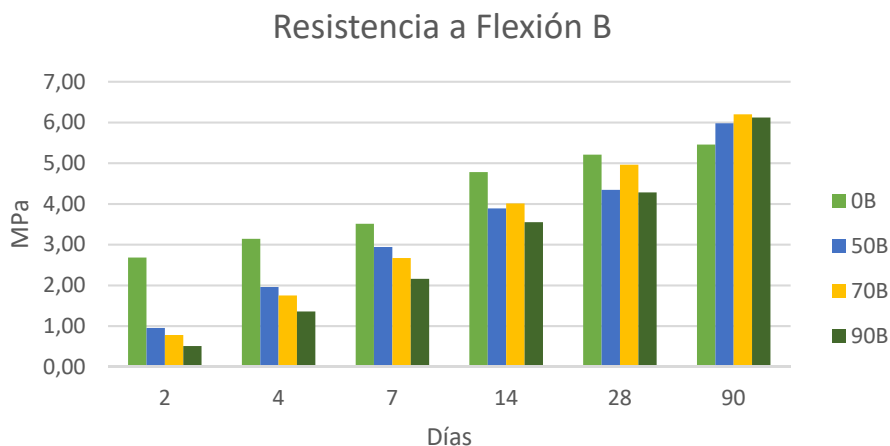


Figura 5. 20: Representación gráfica de las medias de la rotura a Flexión de las mezclas tipo B

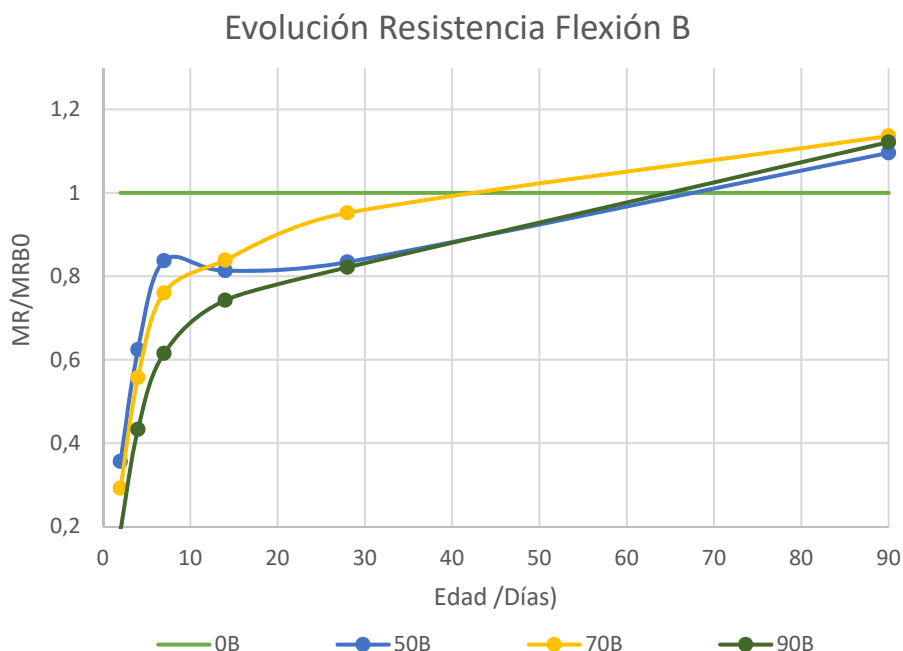


Figura 5. 21: Evolución de la Resistencia a Flexión a lo largo del tiempo

Se puede observar como la mezcla con sustitución de escoria B70 es la que alcanza antes a la mezcla de referencia B0, aproximadamente a los 40 días, superándola a los 90 días un 13,62% de ganancia de resistencia a flexión, mientras que las mezclas B50 y B90 tienen un comportamiento similar, no llegando a alcanzar a la mezcla de referencia B0, hasta los 70 días, para después superar la resistencia hasta los 90 días.

### 5.7.3 Resultados de las probetas tipo C

En este apartado, en la Tabla 5.13 se muestran los resultados medios de la rotura a flexión de las probetas tipo C, mezclas compuestas por cemento CEM I 42,5 y relación agua/cemento 0,67/1, teniendo como mezcla de referencia la C0 (sin sustitución) y las distintas mezclas con los distintos porcentajes de sustitución de escoria GGBFS (C50, C70, C90).

Resistencias a Flexión C (MPa)							
Días	2	4	7	14	28	90	% ganancia a 90 días
0C	3,36	3,54	3,92	5,30	6,23	6,54	0,00%
50C	1,66	2,77	3,51	4,58	5,38	6,80	3,99%
70C	1,20	2,08	3,30	4,21	5,69	7,45	14,00%
90C	0,46	1,75	2,03	4,44	4,77	6,76	3,38%

Tabla 5. 13: Valores medios de la Resistencia a Flexión de las mezclas tipo C

Seguidamente se muestran las Figuras 5.22 y 5.23 donde se representan de manera gráfica los resultados de la Tabla 5.13, en las cuales se aprecian perfectamente la evolución de las resistencias para cada una de las roturas. En la Figura 5.22 los datos se agrupan según el tiempo y los porcentajes de sustitución realizados. La Figura 5.23 también permite analizar el comportamiento de cada mezcla con respecto a la mezcla de referencia. Cada curva de resultados MR no está dimensionada con respecto al valor correspondiente de C0 ( $MR_{C0}$ ).

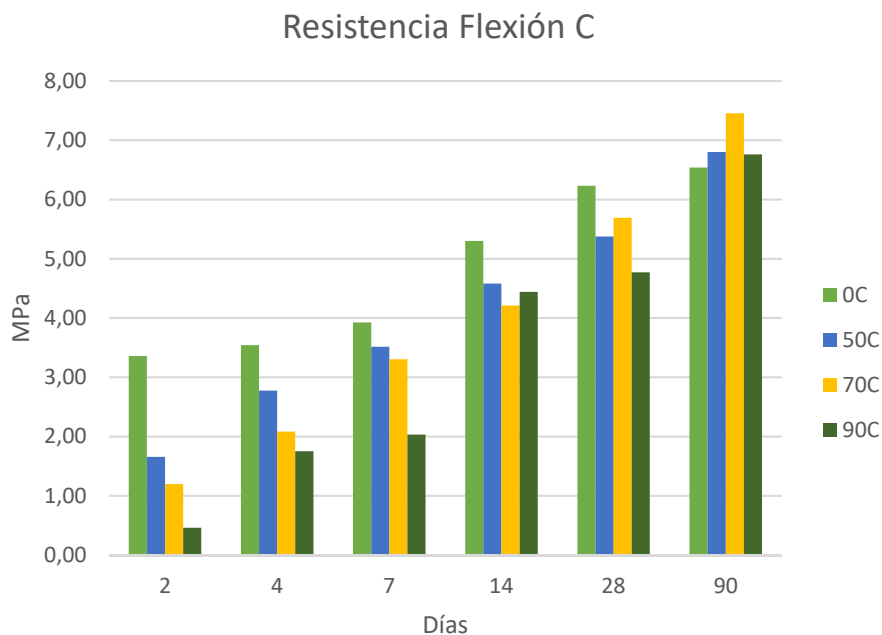


Figura 5. 22: Representación gráfica de las medias de la rotura a Flexión de las mezclas tipo C

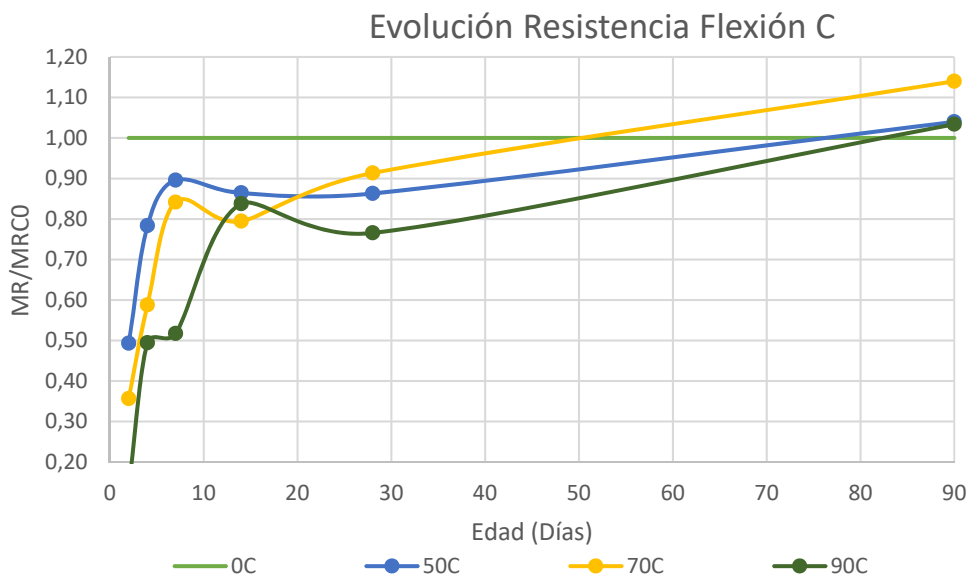


Figura 5. 23: Evolución de la Resistencia a Flexión a lo largo del tiempo

En este caso la resistencia aumenta conforme el porcentaje de sustitución es más pequeño durante los primeros 14 días de fraguado aproximadamente, sin llegar a alcanzar la mezcla de referencia C0, a partir de aquí la resistencia de las mezclas con sustitución evolucionan más lentamente, aumentando la resistencia a flexión la C70, por encima de las otras dos mezclas con sustitución, alcanzando ésta a la de referencia a los 50 días de fraguado, llegando a obtener un 14% de ganancia de resistencia a flexión a los 90 días.

#### 5.7.4 Resultados de las probetas tipo D

En este apartado, en la Tabla 5.14 se muestran los resultados medios de la rotura a flexión de las probetas tipo D, mezclas compuestas por cemento CEM I 52,5 y relación agua/cemento 0,67/1, teniendo como mezcla de referencia la D0 (sin sustitución) y las distintas mezclas con los distintos porcentajes de sustitución de escoria GGBFS (D50, D70, D90).



Resistencias a Flexión D (MPa)							
Días	2	4	7	14	28	90	Ganancia a 90 días
<b>0D</b>	4,55	5,13	5,40	5,67	6,09	7,03	0,00%
<b>50D</b>	2,38	3,84	4,24	4,76	5,69	7,49	6,54%
<b>70D</b>	1,66	3,14	3,23	5,06	6,40	8,02	14,08%
<b>90D</b>	0,61	1,40	1,95	4,43	6,03	7,63	8,53%

Tabla 5. 14: Valores medios de la Resistencia a Flexión de las mezclas tipo D

A continuación, se muestran las Figuras 5.24 y 5.25 donde se representan de manera gráfica los resultados de la Tabla 5.14, en las cuales se aprecian perfectamente la evolución de las resistencias para cada una de las roturas. En la Figura 5.24 los datos se agrupan según el tiempo y los porcentajes de sustitución realizados. La Figura 5.25 también permite analizar el comportamiento de cada mezcla con respecto a la mezcla de referencia. Cada curva de resultados MR no está dimensionada con respecto al valor correspondiente de D0 ( $MR_{D0}$ ).

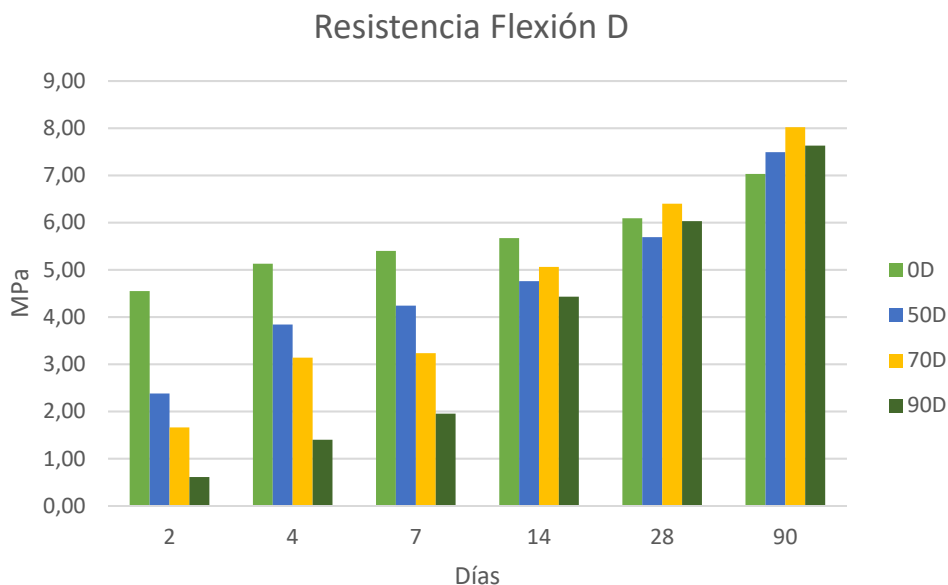


Figura 5. 24: Representación gráfica de las medias de la rotura a Flexión de las mezclas tipo C

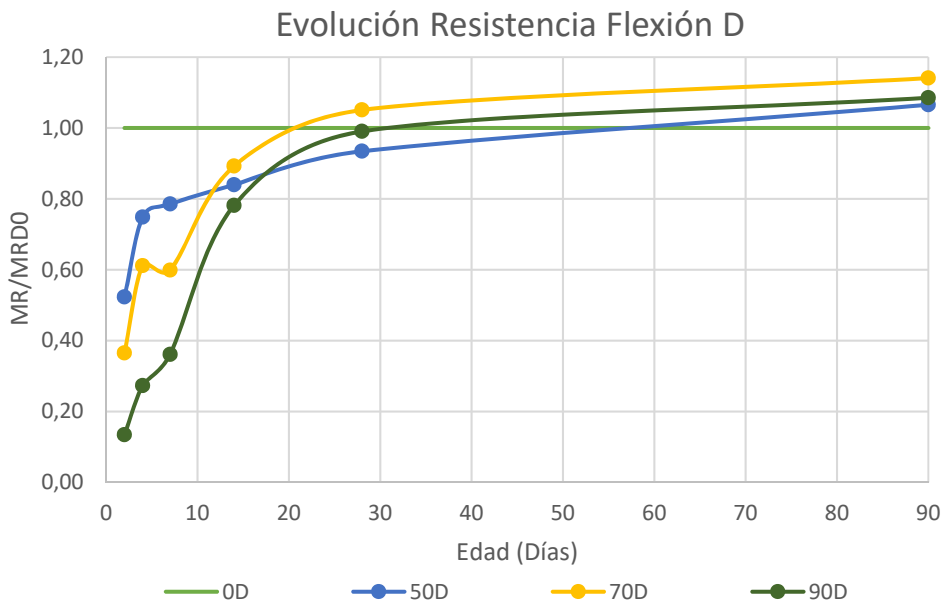


Figura 5. 25: Evolución de la Resistencia a Flexión a lo largo del tiempo

El comportamiento de estas mezclas es prácticamente igual que las del tipo C en los primeros días de fraguado, aunque en estas, a partir de los 14 días la D90 supera a la mezcla D50, siempre comportándose de mejor forma la D70, aumentando la resistencia a flexión con respecto al resto a los 90 días, obteniendo una ganancia del 14,08%.

### 5.7.5 Comparación entre las mezclas A y B

La Figura 5.26 muestra la comparación entre las mezclas realizadas con la misma relación agua/cemento, relación 1/1. Para así tener una visión global de la evolución de la resistencia a flexión en función del cemento utilizado.

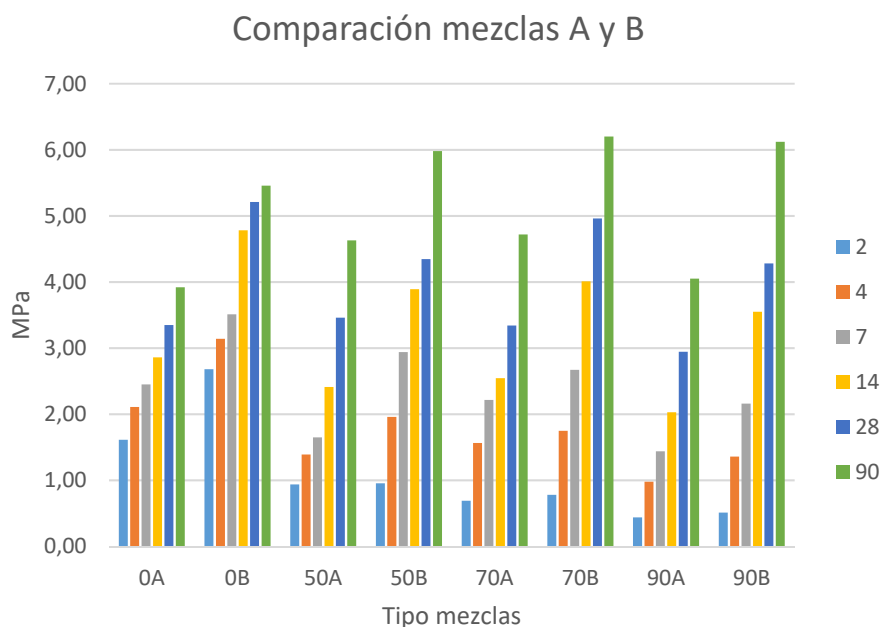


Figura 5. 26: Comparación de la evolución de resistencia a flexión mezclas A y B

Se puede observar, como era de esperar que las mezclas siguen prácticamente la misma evolución, en cuanto a ganancia de resistencia a lo largo del tiempo, siendo las tipo B, realizadas con cemento 52,5 R las que más resistencia alcanza en cada uno de los tiempos. Ninguna de las mezclas con sustitución de escorias, en los primeros días de endurecimiento logran alcanzar la sin sustitución, las consideradas como referencia, A0 y B0, en cambio, a partir de los 28 días todas ellas superan a las de referencia, siendo mucho más acusado este aumento a los 90 días.

### 5.7.6 Comparación entre las mezclas C y D

En este apartado igual que en el anterior, la Figura 5.27 muestra la comparación entre las mezclas realizadas con la misma relación agua/cemento, relación 0,67/1. Para así tener una visión global de la evolución de la resistencia a flexión en función del cemento utilizado.

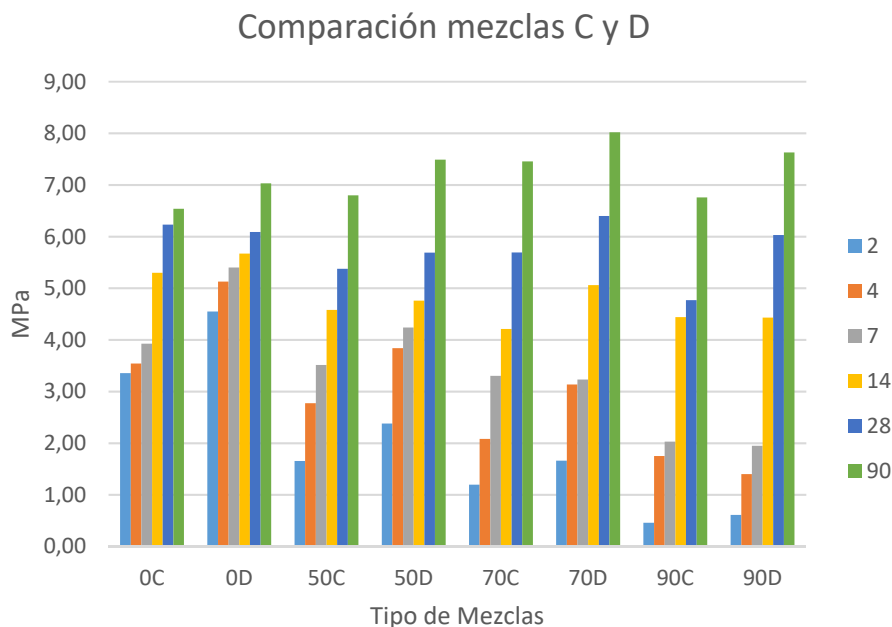


Figura 5. 27: Comparación de la evolución de resistencia a flexión mezclas C y D

Se puede observar, en este caso como la evolución se iguala prácticamente en todas las mezclas, indistintamente del tipo de cemento utilizado, retrasándose la evolución de resistencia en función del porcentaje de sustitución realizado, así cuando hay un aumento del porcentaje sustituido más retraso en el endurecimiento en los primeros días de fraguado. En este tipo de mezclas no se refleja una ganancia de resistencia con respecto a las mezclas de referencia hasta los 90 días.

### 5.7.7 Comparación entre las mezclas A y C

Se puede observar en la Figura 5.28 la comparación entre las mezclas realizadas con el mismo tipo de cemento (42,5), y las diferentes relaciones agua/cemento siendo estas 1/1 y 0,67/1. Para así tener una visión global de la evolución de la resistencia a flexión en función de la relación agua/cemento usada.

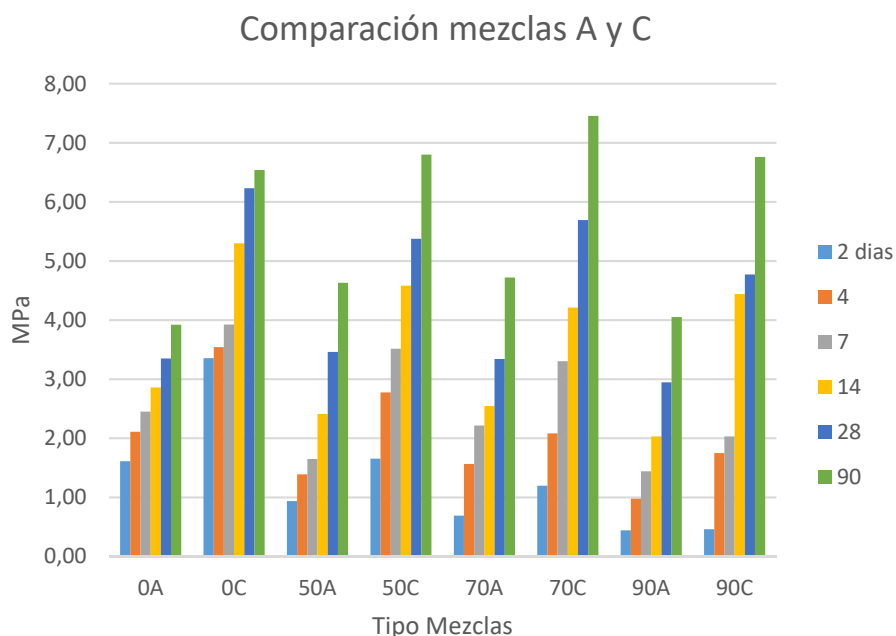


Figura 5. 28: Comparación de la evolución de resistencia a flexión mezclas A y C

Las mezclas tipo C reflejan mejor comportamiento con respecto a la ganancia de resistencia a flexión que las de tipo A, es decir las mezclas con relación agua/cemento 0,67/1.

### 5.7.8 Comparación entre las mezclas B y D

Como en el caso anterior en la Figura 5.29 se muestra la comparación entre las mezclas realizadas con el mismo tipo de cemento (52,5), y las diferentes relaciones agua/cemento utilizadas 1/1 y 0,67/1. Para así tener una visión global de la evolución de la resistencia a flexión en función de la relación agua/cemento utilizada.

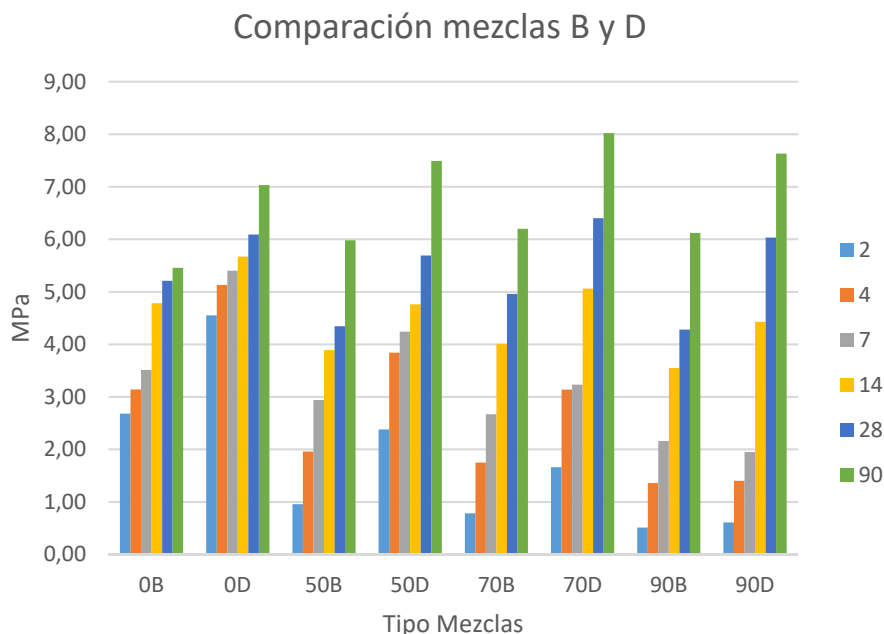


Figura 5. 29: Comparación de la evolución de resistencia a flexión mezclas B y D

Al igual que en el caso de la comparación entre las mezclas tipo A y C, la evolución de las ganancias de resistencia a flexión sigue siendo no muy acusada.

## 5.8 Ensayo de compresión

### 5.8.1 Resultados probetas tipo A

En la Tabla 5.15 se detallan los resultados medios de la rotura a compresión de las probetas tipo A, mezclas compuestas por cemento CEM I 42,5 y relación agua/cemento 1/1, teniendo como referencia la A0 (sin sustitución) y las distintas mezclas con los distintos porcentajes de sustitución de escoria GGBFS (A50, A70, A90). Se puede observar, también, la ganancia de resistencia a 90 días de las mezclas con escorias, A50, A70 y A90, con respecto a la mezcla sin escoria A0.

Resistencias a Compresión A (MPa)							
Días	2	4	7	14	28	90	Ganancias a 90 días
A0	4,72	6,86	8,54	9,40	11,24	15,91	0,00%
A50	2,50	5,01	6,49	8,23	11,79	17,20	8,1%
A70	1,83	4,47	6,92	8,59	13,57	21,25	33,5%
A90	1,05	3,57	6,33	8,39	12,32	14,53	-8,7%

Tabla 5. 15: Valores medios de la Resistencia a Compresión de las mezclas tipo A

A continuación, se muestran las Figuras 5.30 y 5.31 donde se representan de manera gráfica los resultados de la Tabla 5.15, en las cuales se aprecian perfectamente la evolución de las resistencias para cada una de las roturas. En la Figura 5.30 los datos se agrupan según el tiempo y los porcentajes de sustitución realizados. La Figura 5.31 también permite analizar el comportamiento de cada mezcla con respecto a la mezcla de referencia. Cada curva de resultados MR no está dimensionada con respecto al valor correspondiente de A0 ( $MR_{A0}$ ).

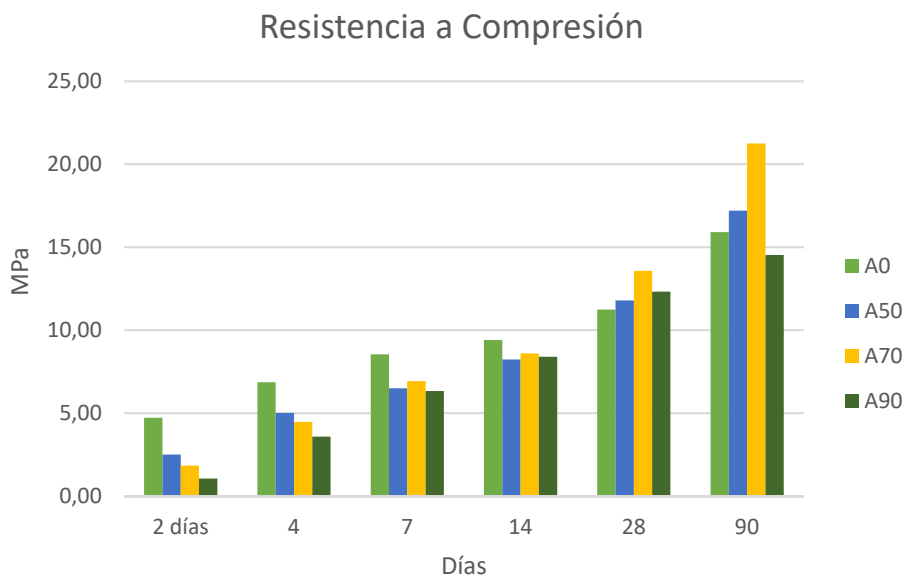


Figura 5. 30: Representación gráfica de las medias de la rotura a Compresión de las mezclas tipo A

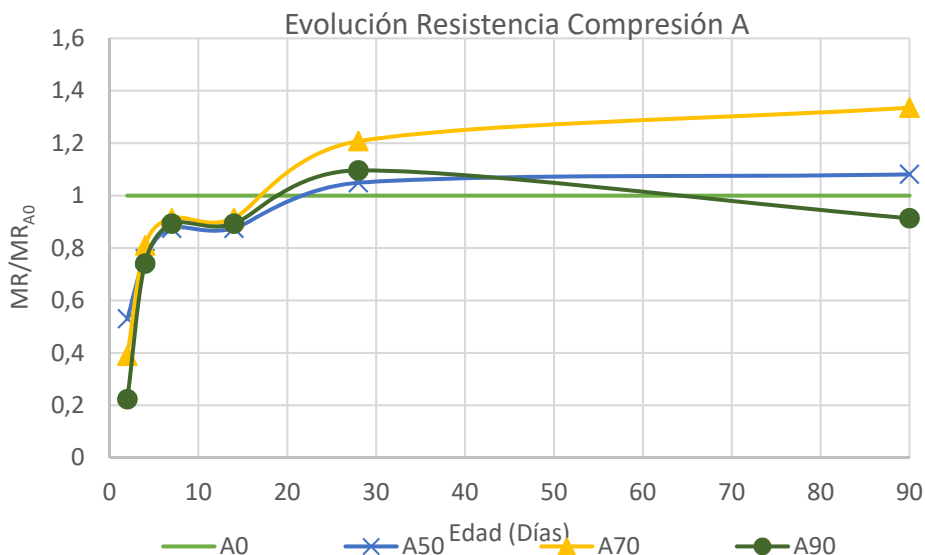


Figura 5. 31: Evolución de la Resistencia a Compresión a lo largo del tiempo

Se observa como en los 4 primeros días, ninguna de las mezclas con sustitución de escorias alcanza la resistencia a compresión de la mezcla de referencia A0, a partir de los 20 días todas las mezclas alcanzan más resistencia que la de referencia. Siendo las del 50 y 70 % las que alcanzan un aumento de resistencia progresivo hasta los 90 días, adquiriendo la mezcla del 70%, (A70) hasta un 33,5% de ganancia. La mezcla con sustitución del 90% a partir de los 28 días aumenta moderadamente su resistencia, siendo la que peor se comporta en su evolución llegando a obtener pérdida de resistencia con respecto a la de referencia A0, de hasta un 8,7%.

### 5.8.2 Resultados probetas tipo B

A continuación, en la Tabla 5.16 se muestran los resultados medios de la rotura a compresión de las probetas tipo B, mezclas compuestas por cemento CEM I 52,5 y relación agua/cemento 1/1, teniendo como mezcla de referencia la B0 (sin sustitución) y las distintas mezclas con los distintos porcentajes de sustitución de escoria GGBFS (B50, B70, B90).



Resistencias a Compresión B (MPa)							
Días	2	4	7	14	28	90	Ganancia a 90 días
<b>B0</b>	7,70	8,31	10,22	14,68	15,18	16,92	0,00%
<b>B50</b>	3,67	5,60	7,50	12,57	16,25	24,26	43,38%
<b>B70</b>	1,93	4,64	8,00	13,25	16,83	29,55	74,66%
<b>B90</b>	1,33	3,55	5,86	9,64	12,90	16,98	0,35%

Tabla 5. 16: Valores medios de la Resistencia a Compresión de las mezclas tipo B

A continuación, se muestran las Figuras 5.32 y 5.33 donde se representan de manera gráfica los resultados de la Tabla 5.16, en las cuales se aprecian perfectamente la evolución de las resistencias para cada una de las roturas. En la Figura 5.32 los datos se agrupan según el tiempo y los porcentajes de sustitución realizados. La Figura 5.33 también permite analizar el comportamiento de cada mezcla con respecto a la mezcla de referencia. Cada curva de resultados MR no está dimensionada con respecto al valor correspondiente de B0 ( $MR_{B0}$ ).

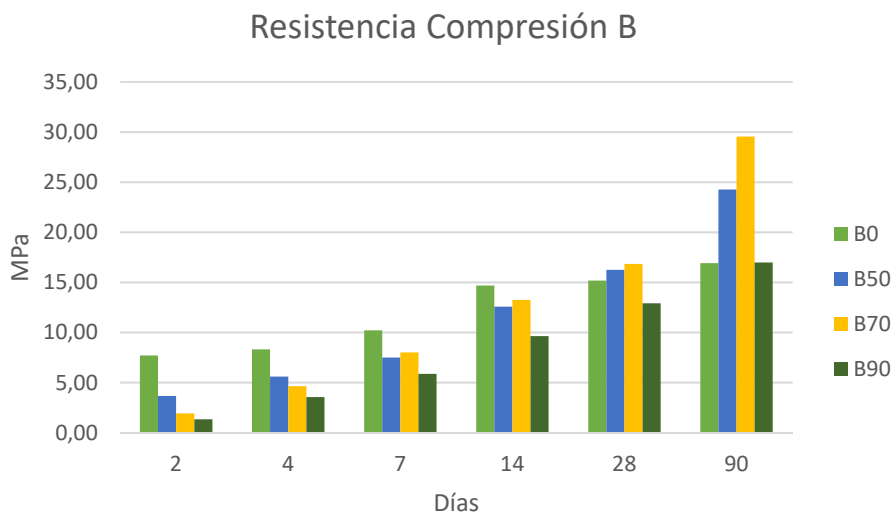


Figura 5. 32: Representación gráfica de las medias de la rotura a Compresión de las mezclas tipo B

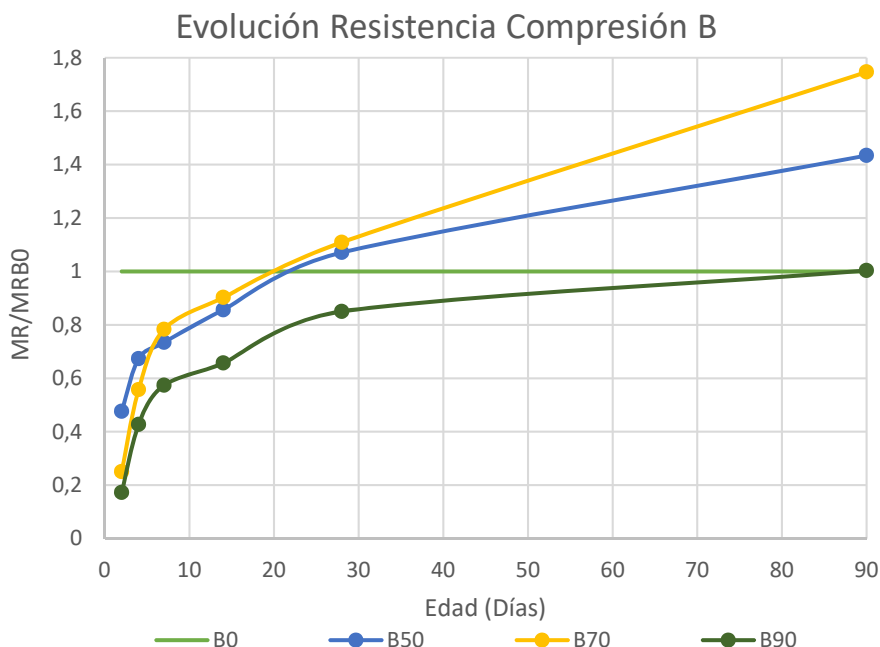


Figura 5. 33: Evolución de la Resistencia a Compresión a lo largo del tiempo

En este tipo de mezclas, las realizadas con sustitución de escorias no alcanzan a la mezcla de referencia B0, hasta los 28 días, aunque la B90, no logra alcanzar a la de referencia B0 hasta los 90 días. Las mezclas B70 y B90 desde el inicio van prácticamente de la mano, pero al llegar a los 20 días la B70 va alcanzando mayor resistencia que la A50 hasta llegar a los 90 días, llegando a obtener hasta un 74,66% de ganancia con respecto a la mezcla de referencia.

### 5.8.3 Resultados probetas tipo C

En este apartado, en la Tabla 5.17 se muestran los resultados medios de la rotura a compresión de las probetas tipo C, mezclas compuestas por cemento CEM I 42,5 y relación agua/cemento 0,67/1, teniendo como mezcla de referencia la C0 (sin sustitución) y las distintas mezclas con los distintos porcentajes de sustitución de escoria GGBFS (C50, C70, C90).

Resistencias a Compresión C (MPa)							
Días	2	4	7	14	28	90	Ganancia a 90 días
<b>C0</b>	10,06	10,84	11,56	18,32	20,14	20,36	0,00%
<b>C50</b>	5,64	6,88	10,70	12,99	17,89	23,51	15,49%
<b>C70</b>	3,64	7,18	11,11	17,54	23,02	23,75	16,67%
<b>C90</b>	1,71	6,25	11,00	15,16	17,74	21,03	3,31%

Tabla 5. 17: Valores medios de la Resistencia a Compresión de las mezclas tipo C

Seguidamente se muestran las Figuras 5.34 y 5.35 donde se representan de manera gráfica los resultados de la Tabla 5.18, en las cuales se aprecian perfectamente la evolución de las resistencias para cada una de las roturas. En la Figura 5.34 los datos se agrupan según el tiempo y los porcentajes de sustitución realizados. La Figura 5.35 también permite analizar el comportamiento de cada mezcla con respecto a la de referencia. Cada curva de resultados MR no está dimensionada con respecto al valor correspondiente de C0 (MR<sub>C0</sub>).

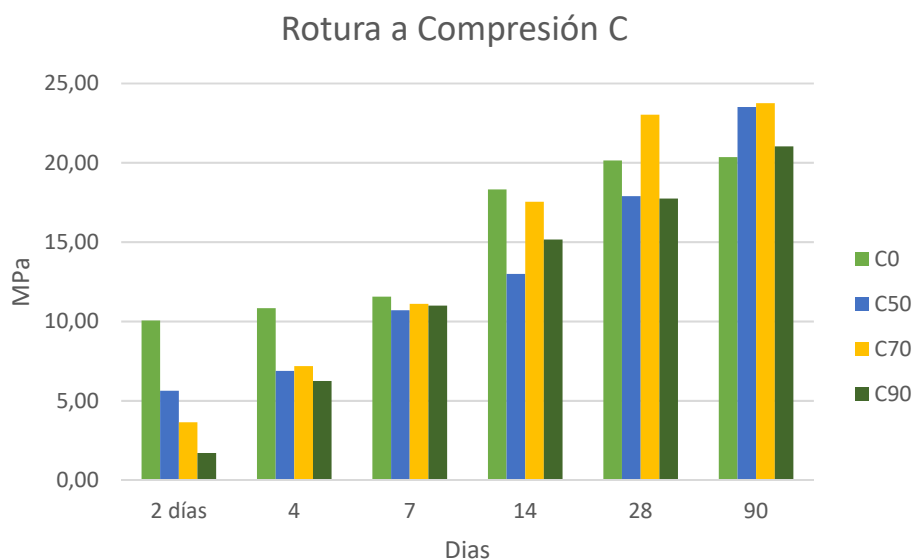


Figura 5. 34: Representación gráfica de las medias de la rotura a Compresión de las mezclas tipo C

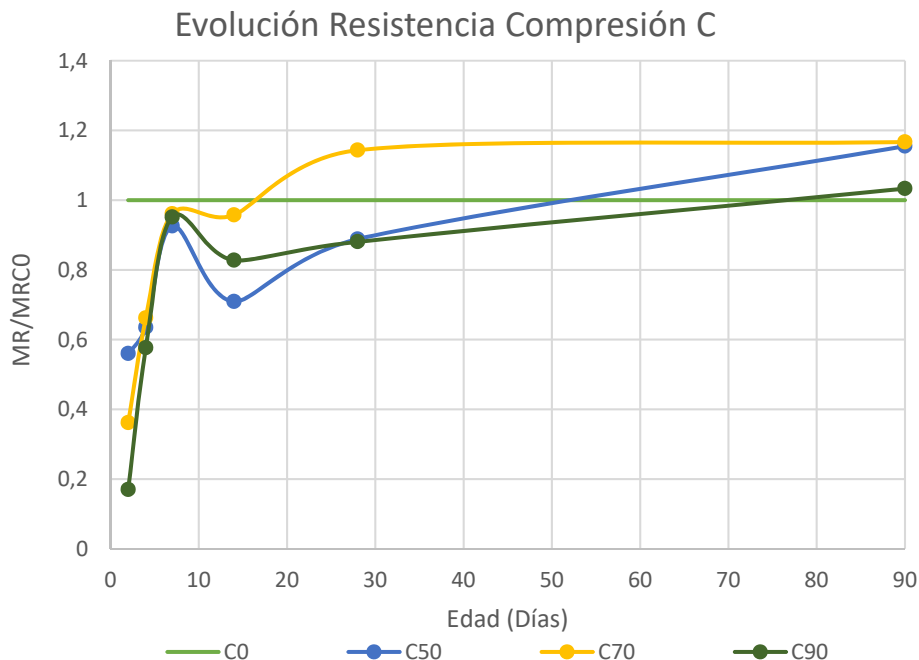


Figura 5. 35: Evolución de la Resistencia a Compresión a lo largo del tiempo

Todas las mezclas con sustitución de escorias en los primeros días de fraguado aumentan su resistencia de manera similar sin llegar a alcanzar a la mezcla de referencia C0, a partir de los siete días la C70 casi iguala a la de referencia C0, superándola a partir de los 14 días, llegando a obtener a los 90 días hasta un 16,67% de ganancia. Sin embargo, las mezclas A50 y A90, en los primeros 7 días casi igualan a la mezcla de referencia C0, para posteriormente ir aumentando ligeramente su resistencia, haciéndolo en menor medida que la de referencia, no siendo hasta los 50 días aproximadamente cuando logran superar a la C0.

#### 5.8.4 Resultados probetas tipo D

En este apartado, en la Tabla 5.18 se muestran los resultados medios de la rotura a compresión de las probetas tipo D, mezclas compuestas por cemento CEM I 52,5 y relación agua/cemento 0,67/1, teniendo como

mezcla de referencia la D0 (sin sustitución) y las distintas mezclas con los distintos porcentajes de sustitución de escoria GGBFS (D50, D70, D90).

Resistencias a Compresión D (MPa)							
Días	2	4	7	14	28	90	Ganancia a 90 días
<b>D0</b>	12,89	13,98	17,14	18,05	18,79	23,24	0,00%
<b>D50</b>	7,13	11,86	17,67	18,44	22,61	35,63	53,30%
<b>D70</b>	4,71	10,06	15,16	19,81	27,69	36,56	57,32%
<b>D90</b>	1,95	7,40	12,60	17,59	22,17	24,33	4,69%

Tabla 5. 18: Valores medios de la Resistencia a Compresión de las mezclas tipo D

A continuación, se muestran las Figuras 5.36 y 5.37 donde se representan de manera gráfica los resultados de la Tabla 5.19, en las cuales se aprecian perfectamente la evolución de las resistencias para cada una de las roturas. En la Figura 5.36 los datos se agrupan según el tiempo y los porcentajes de sustitución realizados. La Figura 5.37 también permite analizar el comportamiento de cada mezcla con respecto a la mezcla de referencia. Cada curva de resultados MR no está dimensionada con respecto al valor correspondiente de D0 ( $MR_{D0}$ ).

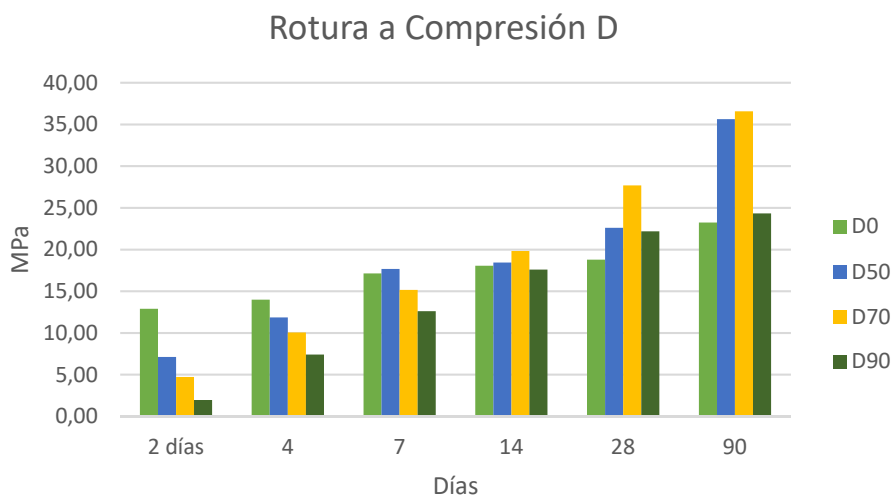


Figura 5. 36: Representación gráfica de las medias de la rotura a Compresión de las mezclas tipo D

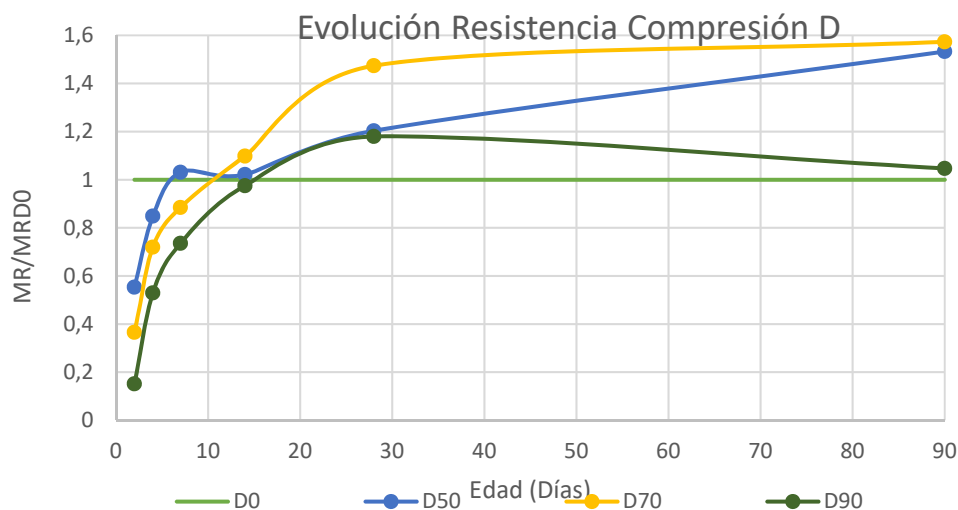


Figura 5. 37: Evolución de la Resistencia a Compresión a lo largo del tiempo

En estas mezclas la D50 a los 7 días alcanza la misma resistencia a compresión que la de referencia D0, en cambio las mezclas D70 y D90 no lo hacen hasta los 14 días, a partir de los cuales todas las mezclas con sustitución de escorias van aumentando su resistencia siendo la que mayor ganancia alcanza la D90 hasta los 40 días donde empieza a disminuir su velocidad y es superada por las D50 y D70 que llegan a obtener hasta un 53,30 y 57,32% respectivamente, de ganancia de resistencia a compresión con respecto a la de referencia D0.

### 5.8.5 Comparación entre las mezclas A y B

La Figura 5.38 muestra la comparación entre las mezclas realizadas con la misma relación agua/cemento, relación 1/1. Para así tener una visión global de la evolución de la resistencia a compresión en función del cemento utilizado.

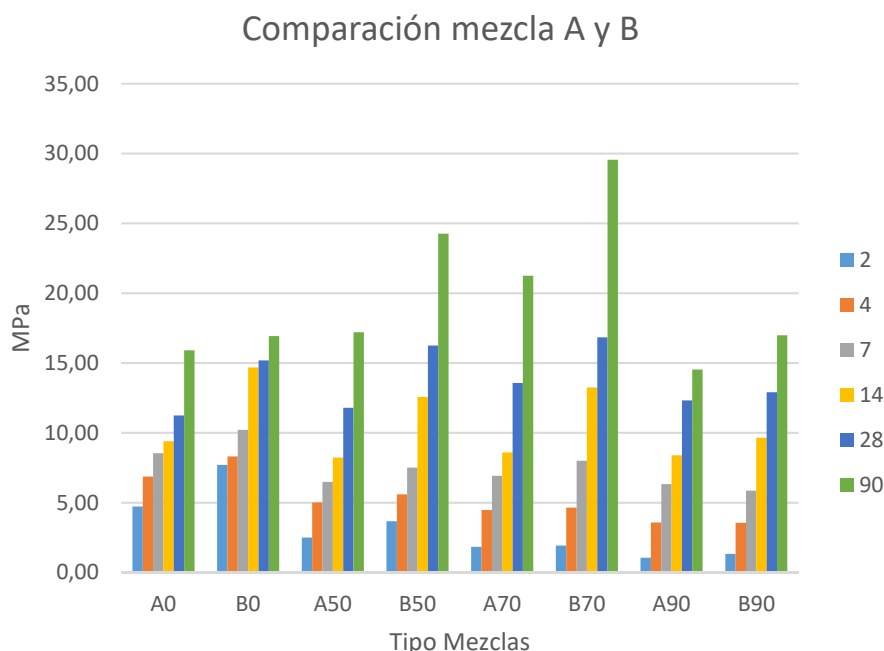


Figura 5. 38: Comparación de la evolución de resistencia a compresión mezclas A y B

Se puede observar, que las mezclas siguen prácticamente la misma evolución, en cuanto a ganancia de resistencia a lo largo del tiempo, siendo las mezclas tipo B, realizadas con cemento 52,5 las que más resistencia alcanzan en cada uno de los tiempos. Ninguna de las mezclas con sustitución de escorias, en los primeros días de endurecimiento logran alcanzar la mezcla sin sustitución, las consideradas como referencia, A0 y B0, en cambio, a partir de los 28 días todas las mezclas superan a las de referencia, siendo mucho más acusado este aumento a los 90 días.

### 5.8.6 Comparación entre las mezclas C y D

En este apartado igual que en el anterior, la Figura 5.39 muestra la comparación entre las mezclas realizadas con la misma relación agua/cemento, relación 0,67/1. Para así tener una visión global de la evolución de la resistencia a flexión en función del cemento utilizado.

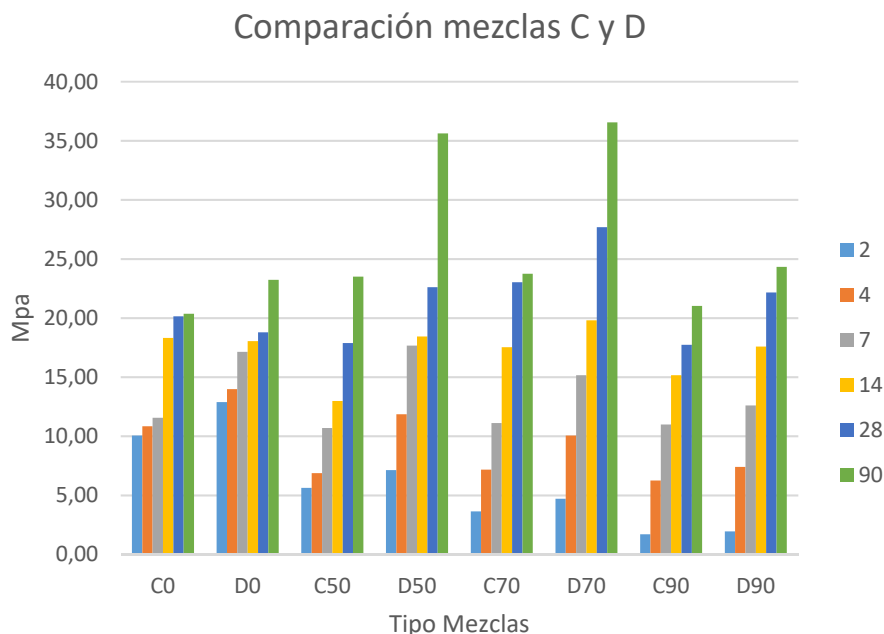


Figura 5. 39: Comparación de la evolución de resistencia a compresión mezclas C y D

Se puede observar, en este caso como la evolución se iguala prácticamente en todas las mezclas, indistintamente del tipo de cemento utilizado, retrasándose la evolución de resistencia en función del porcentaje de sustitución aplicado, cuanto más porcentaje de sustitución utilizado más retraso en el endurecimiento en los primeros días de fraguado. En este tipo de mezclas se refleja una ganancia de resistencia con respecto a las mezclas de referencia a partir de los 28 días, siendo la mezcla que mejor se comporta la del 70 % de sustitución.

### 5.8.7 Comparación entre las mezclas A y C

Se puede observar en la Figura 5.40 la comparación entre las mezclas realizadas con el mismo tipo de cemento (42,5), y las diferentes relaciones agua/cemento utilizadas 1/1 y 0,67/1. Para así tener una visión global de la evolución de la resistencia a compresión en función de la relación agua/cemento utilizada.



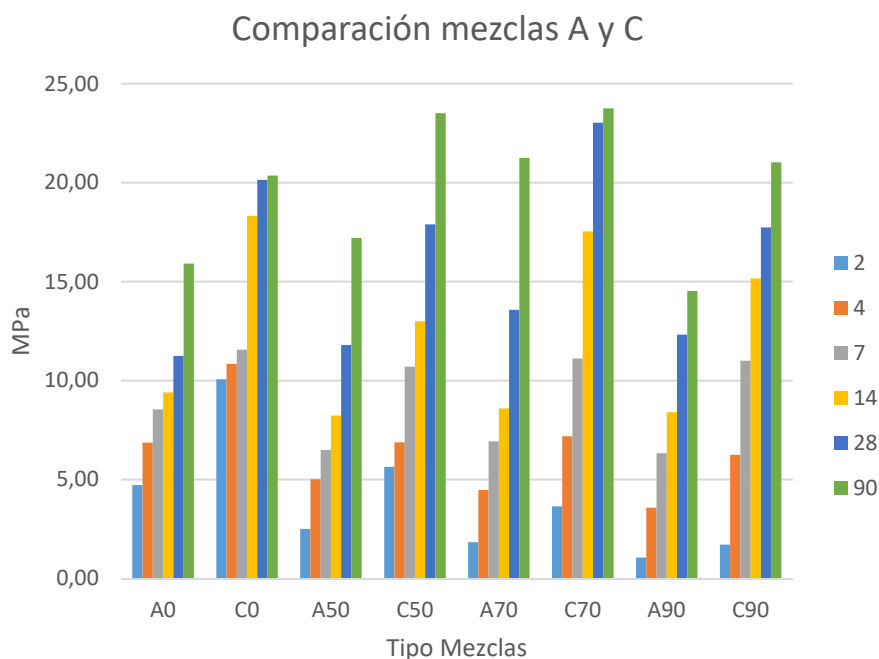


Figura 5. 40: Comparación de la evolución de resistencia a compresión mezclas A y C

Al igual que pasa con la resistencia a flexión, las mezclas tipo C reflejan mejor comportamiento con respecto a la ganancia de resistencia a compresión que las mezclas tipo A, o sea las mezclas con relación agua/cemento 0,67/1.

### 5.8.8 Comparación entre las mezclas B y D

Como en el caso anterior en la Figura 5.41 se muestra la comparación entre las mezclas realizadas con el mismo tipo de cemento (52,5), y las diferentes relaciones agua/cemento utilizadas 1/1 y 0,67/1. Para así tener una visión global de la evolución de la resistencia a compresión en función de la relación agua/cemento utilizada.

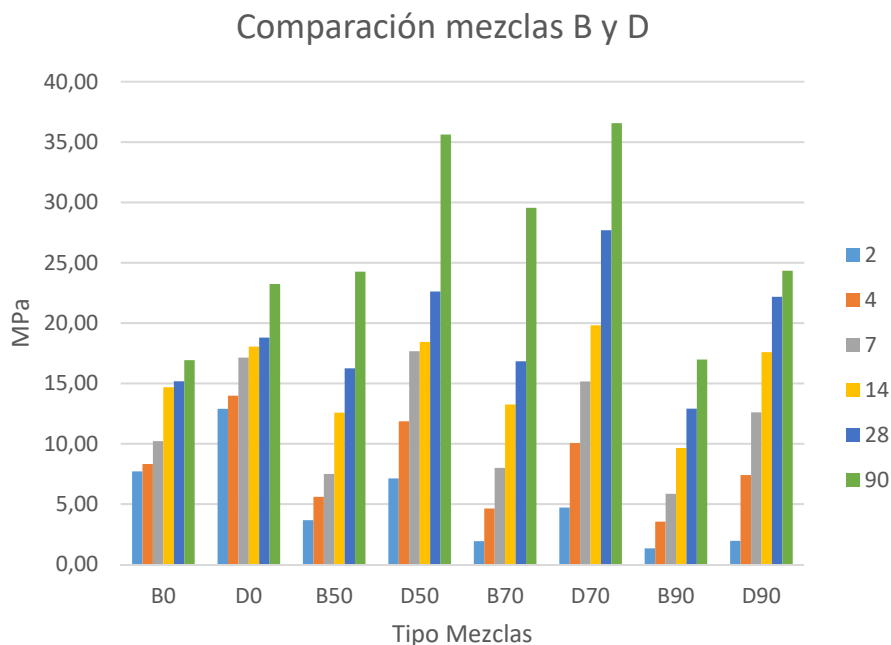


Figura 5. 41: Comparación de la evolución de resistencia a compresión mezclas B y D

Las mezclas tipo D adquieren mejor comportamiento en cuanto a la resistencia a compresión que las de tipo B.

## 5.9 Resumen de ideas principales

En este capítulo se presentan los resultados experimentales realizados a las mezclas en estado fresco y en estado endurecido, realizados en la segunda parte de la investigación, donde se han preparado lechadas con sustitución de escorias GGBFS, en porcentajes de sustitución hasta el 90%, con relaciones agua/cemento de 1/1 y 0,67/1 y con cementos CEM I 42,5 y 52,5.

De forma general, las mezclas con sustitución de escorias mejoran con respecto a las mezclas sin sustitución, al igual que sucede en estudios realizados con el hormigón [8].

Las mezclas con escorias son menos densas que las mezclas sin sustitución, haciéndose más fluidas conforme aumenta el % de sustitución.

En todos los tipos de mezclas con sustitución de escorias la exudación disminuye con respecto a las mezclas sin sustitución, haciéndolo también en relación al % de sustitución, cuanto mayor es el % menor es la exudación, al igual que como era de esperar las mezclas con relación agua/cemento 1/1 exudan mucho más que las de relación 0,67/1, en el orden del 25%.

Resultados esperados ya que la densidad del cemento es mayor que la densidad de la escoria y la superficie específica de la escoria es mayor que la del cemento.

Este tipo de escorias, GGBFS no expanden y las mezclas realizadas con ellas lixivian elementos químicos en menor medida que las mezclas convencionales, las fabricadas únicamente con cemento.

La respuesta mecánica en cuanto a flexión y compresión desprende mejores resultados en todos los tipos de mezclas realizadas con escorias que la realizada con cemento.

Uno de los efectos observados con la sustitución de escoria es que el proceso de endurecimiento de la mezcla se modifica y retrasa. El principal problema de este tipo de mezclas es que a edades tempranas la convencional adquiere con mayor rapidez la resistencia a la flexión y compresión, pero por el contrario con el paso del tiempo el porcentaje de resistencia aumenta.

Por otro lado, las mezclas fabricadas con cemento CEM I 52,5R alcanzan más resistencias tanto en flexión como en compresión que las fabricadas con cemento CEM I 42,5 R, excepto las mezclas con el 90% de sustitución donde al tener tan alto porcentaje de escorias el comportamiento es prácticamente el mismo con los dos tipos de cemento.

Se observa también que las mezclas realizadas con sustitución de escorias y con relación agua/cemento 1/1 son las que más ganancia de resistencia tanto a flexión como a compresión adquieren con respecto a la mezcla sin sustitución de escoria, debido a la mayor hidratación de las escorias que componen la mezcla.

También se desprende que las mezclas óptimas son las realizadas con el porcentaje del 70% de sustitución, tanto con los diferentes tipos de



cemento y diferentes tipos de relación agua/cemento, tanto a flexión como a compresión.

### 5.10 Bibliografía

1. European Committee for standardization EN 445: 2001 Grout for prestressing tendons. Test methods.
2. European Committee for standardization EN 447: 2009 Grout for prestressing tendons. Basic requirements.
3. European Committee for standardization EN 196-3:2017 Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness.
4. Van der Sloot, H. A.; Heasman, L.; Quevauviller, C. 2: G. principles for the leaching and extraction of materials. P. No Title. *Stud. Environ. Sci.* 1997, 70, 13–39, doi10.1016/S0166-1116(97)80111-2.
5. Din 38414-17 German standards methods for the examination of water, waste water and sludge-group S. (sludge and sediment); determination of leachability (S4) Institut für Normung, Berlin 2004, 1–10.
6. European Committee for standardization EN 12920:2007 Characterization of waste - Methodology for the Determination of the Leaching Behaviour of Waste under Specified Conditions.
7. European Committee for standardization EN 14405-1:2018 Geometrical product specifications (GPS) - Dimensional tolerancing - Part 1: Linear sizes.
8. Parron-Rubio, M.; Perez-García, F.; Gonzalez-Herrera, A.; Rubio-Cintas, M. Concrete Properties Comparison When Substituting a 25% Cement with Slag from Different Provenances. *Materials (Basel)*. **2018**, 11, 1029, doi:10.3390/ma11061029.



# **CAPÍTULO 6**

## **Aplicación práctica de la nueva matriz cementante**



## ÍNDICE

6.1 Introducción .....	191
6.2 Pruebas .....	191
6.2.1 Resultados de las pruebas.....	194
6.3 Conclusiones .....	199

## TABLAS

<i>Tabla 6. 1: Dosificaciones de las lechadas, laboratorio y puesta en servicio .....</i>	<i>193</i>
<i>Tabla 6. 2: Ensayo de Fluidez .....</i>	<i>194</i>
<i>Tabla 6. 3 Resultados de la densidad fresca de la lechada.....</i>	<i>195</i>
<i>Tabla 6. 4: Resultados de Resistencia a Flexión lechadas con sustitución del 70% y 90%.....</i>	<i>196</i>
<i>Tabla 6. 5: Resultados de Resistencia a Compresión lechadas con sustitución del 70% y 90% .....</i>	<i>196</i>

## FIGURAS

<i>Figura 6. 1: Mezcla preparada para puesta en servicio en Puerto de Valencia.....</i>	<i>191</i>
<i>Figura 6. 2 Preparación de las probetas Laboratorio Geocisa.....</i>	<i>192</i>
<i>Figura 6. 3 Probetas fabricadas con el 70% y el 90% de escorias.....</i>	<i>193</i>
<i>Figura 6. 4: Ensayo cono de Marsh.....</i>	<i>194</i>
<i>Figura 6. 5: Balanza de lodos.....</i>	<i>195</i>
<i>Figura 6. 6: Realización del ensayo de densidad .....</i>	<i>195</i>
<i>Figura 6. 7: Resultados de Resistencia a compresión de pruebas realizadas con CEM III/A y sustitución escorias GGBFS.....</i>	<i>197</i>
<i>Figura 6. 8: Resultados de Resistencia a Compresión pruebas realizadas con aditivo.....</i>	<i>198</i>
<i>Figura 6. 9: Máquina Perforadora.....</i>	<i>199</i>





## 6.1 Introducción

En este capítulo se desarrolla la puesta en servicio del nuevo material, realizada por la empresa GEOCISA, para el proyecto conjunto que se llevó a cabo en los años 2017-2018 y por el cual esta tesis ha sido posible. El objetivo principal ha sido evaluar la posibilidad de aprovechamiento de diseño y desarrollo del nuevo material cementante a partir de estudios realizados a nivel de laboratorio, para cimentaciones y tratamiento del terreno, Figura 6.1.



*Figura 6. 1: Mezcla preparada para puesta en servicio en Puerto de Valencia*

## 6.2 Pruebas

Todas estas pruebas se han realizado en el laboratorio de Geocisa (Cemex) y validado en el Puerto de Valencia. La Empresa decidió realizar una serie de pruebas tanto en el laboratorio como en obra, para revalidar los resultados obtenidos en el laboratorio de la Escuela Politécnica Superior de Algeciras (EPSA).

Se realizaron tres pruebas adicionales, una primera prueba en el laboratorio con CEM III/A con un 38% de escoria y relación agua/cemento 1/1, una prueba en obra con la misma dosificación y la prueba patrón. A su vez, se probó con la escoria de alto horno GGBFS, ya que una vez sometidas a

ensayos de laboratorio eran las que mejor funcionaban. Se han realizado dos dosificaciones distintas de lechada sustituyendo parte del cemento por escorias en dos porcentajes de sustitución, 70% y 90% con relación agua/cemento de 1/1 y cemento Portland 52,5R.

En la Figura 6.2 se observa la preparación de las probetas de laboratorio, y en la Figura 6.3 las probetas fabricadas con el 70% y el 90% de escorias. Por último, también se decidió fabricar una lechada con el porcentaje de sustitución óptimo (70%), bajando la relación agua/cemento a 0,8/1 y utilizar un aditivo.



Figura 6. 2 Preparación de las probetas Laboratorio Geocisa



Figura 6. 3 Probetas fabricadas con el 70% y el 90% de escorias

La empresa decidió, utilizar las dosificaciones del 70% Y 90%, para ello realizó las pruebas en su laboratorio (Cemex), y finalmente la validación en el Puerto de Valencia se realizó con la dosificación del 70% como se muestra en la Tabla 6.1.

REFERENCIA	22/03-1 LABORATORIO		22/03-2 LABORATORIO		22/03-3 PRUEBA VALIDACIÓN PUERTO VALENCIA	
	%	g	%	g	%	Kg
CEMENTO	30	1120	10	370	30	150
ESCORIA	70	2620	90	3360	70	350
a/c	1(1:1)	3740	1(1:1)	3730	1(1:1)	500

Tabla 6. 1: Dosificaciones de las lechadas, laboratorio y puesta en servicio

Algunas de las observaciones que se tuvieron en cuenta cuando se realizaron las pruebas fueron:

- El material fluidifica más cuanto más porcentaje de escoria se le adiciona, muy por encima de la lechada convencional.

- No se ve agua superficial
- Actúa bien para la inyección

### 6.2.1 Resultados de las pruebas

A continuación se muestran las tablas facilitadas por la empresa Geocisa de los resultados de las pruebas realizadas.

Para cada una de las dosificaciones, en la Tabla 6.2, se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de fluidez, realizado con el cono de Marsh, Figura 6.4.



Figura 6. 4: Ensayo cono de Marsh

FLUIDEZ (sg) CONO MARS							
	22/03-1 LABORATORIO		22/03-2 LABORATORIO		22/03-3 PRUEBA VALIDACIÓN PUERTO VALENCIA		
	Diam=10 mm. (1 litro)	Diam=4,7 mm. (947 ml)	Diam=10 mm. (1 litro)	Diam=4,7 mm. (947 ml)	Diam=10 mm. (1 litro)	Diam=4,7 mm. (947 ml). Inicial	Diam=4,7 mm. (947 ml). Después bombeo
T 0'	10,80	30,25	10,10	30,58	10,50	30,96	29,40
T 60'	10,92	30,12	10,15	30,68	10,61	31,07	29,32

Tabla 6. 2: Ensayo de Fluidez

Se observa en la Tabla 6.2 como los resultados obtenidos por la Empresa no difieren prácticamente con respecto a los resultados obtenidos en el laboratorio de la EPSA.

Se realizó el ensayo de densidad in situ, con un equipo llamado balanza de lodos como refleja la Figura 6.5 y 6.6.



Figura 6. 5: Balanza de lodos



Figura 6. 6: Realización del ensayo de densidad

Los resultados obtenidos en el ensayo de densidad se muestran en la Tabla 6.3.

	DENSIDAD (g/cm3)		
	22/03-1 LABORATORIO	22/03-2 LABORATORIO	22/03-3 PRUEBA VALIDACIÓN PUERTO VALENCIA
Densidad fresca	1,51	1,51	1,51

Tabla 6. 3 Resultados de la densidad fresca de la lechada



siendo los de la Tabla 6.3 los cedidos por la Empresa, prácticamente iguales que los obtenidos en el laboratorio de la EPSA.

A continuación en la Tabla 6.4 se muestran los resultados a flexotracción y en la Tabla 6.5 se observan los de compresión en las pruebas realizadas en el laboratorio de la Empresa, para lechadas con sustitución de cemento por escorias GGBFS en 70% y 90% de sustitución.

**RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN (Mpa) (4x4x16)**

	22/03-1 LABORATORIO	22/03-2 LABORATORIO
4 d	1,67	-----
7 d	2,07	0,66
28 d	2,76	1,68
60d	4,84	2,85

Tabla 6. 4: Resultados de Resistencia a Flexión lechadas con sustitución del 70% y 90%

**RESISTENCIA A COMPRESIÓN (Mpa) (4x4x16)**

	22/03-1 LABORATORIO	22/03-2 LABORATORIO
4 d	5,57	2,67
7 d	9,5	4,5
28 d	20,85	9,55
60 d	26,2	14,7

Tabla 6. 5: Resultados de Resistencia a Compresión lechadas con sustitución del 70% y 90%

Como se ha comentado anteriormente la empresa decidió realizar una prueba, tanto en laboratorio como in situ con un cemento CEM IIIA los cuales tienen un 38% de escorias, utilizándose en la puesta en servicio un aditivo para la aceleración del fraguado, en el cual se ve su comportamiento frente a las dosificaciones realizadas en el laboratorio de la EPSA, con utilización de cemento CEM I y reemplazo por escorias del 70 y 90% sin aditivo.

En la Figura 6.7, se muestran los resultados a compresión de estas primeras pruebas realizadas con cemento CEM III/A y con sustitución de escorias GGBFS.

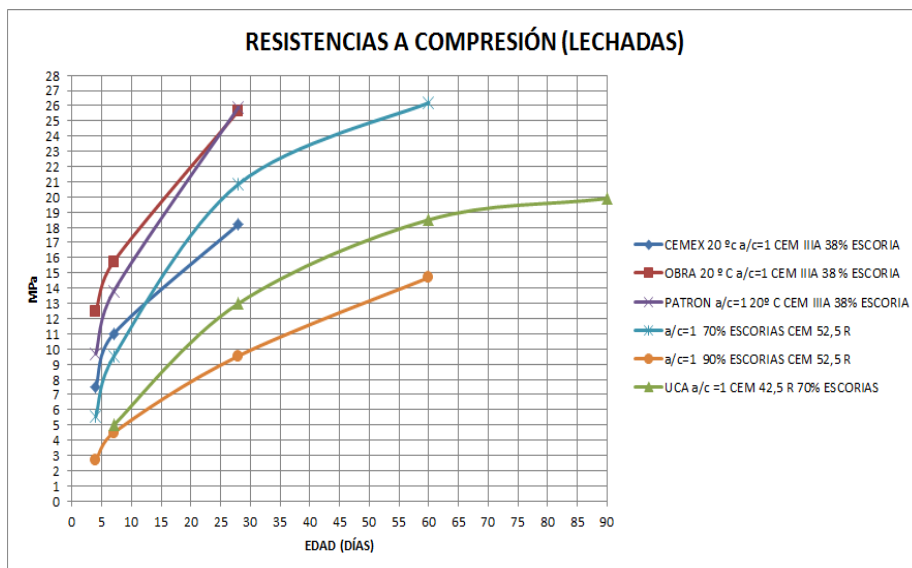


Figura 6. 7: Resultados de Resistencia a compresión de pruebas realizadas con CEM III/A y sustitución escorias GGBFS

Se observa como las mezclas patrón y en obra, fabricadas con CEM IIIA, alcanzan más rápidamente la resistencia que la mezcla realizada en el laboratorio sin aditivo.

La mezcla que se propuso en la EPSA con CEM I y el 70% de sustitución de escoria, aunque en los primeros 25 días no llega a alcanzar la resistencia que el CEM IIIA, con el paso del tiempo obtiene el mismo valor incluso superándolo.



Por último, en la Figura 6.8 se muestran los resultados a compresión obtenidos en las pruebas realizadas con aditivo en los siete primeros días de fraguado, como se ha mencionado anteriormente.

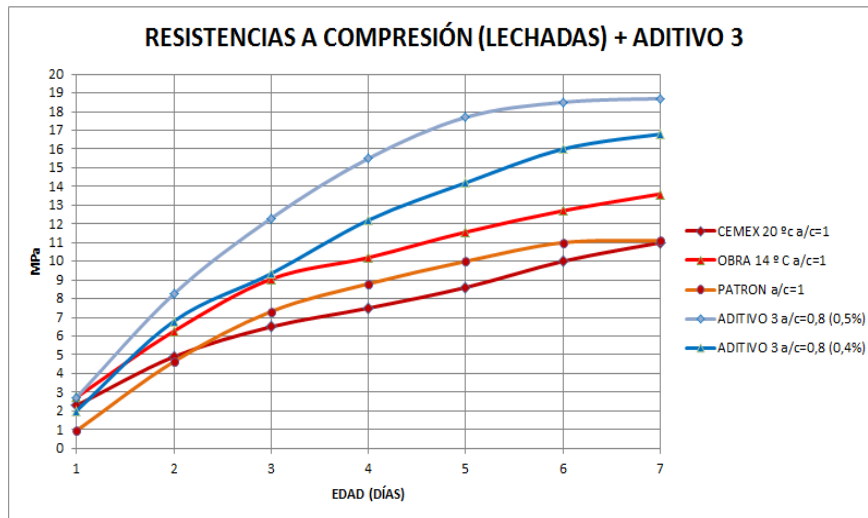


Figura 6. 8: Resultados de Resistencia a Compresión pruebas realizadas con aditivo

Se observa que se ha modificado la relación agua cemento con respecto a la muestra patrón. Estas pruebas se realizaron en la obra no teniendo en cuenta las dosificaciones expuestas por la EPSA. Se muestra como al añadir el aditivo se incrementa la resistencia en los primeros días de fraguado en las mezclas realizadas con escoria.

En la Figura 6.9 se muestra la máquina perforadora para la realización de jet-groutting utilizada por la Empresa en el Puerto de Valencia.



Figura 6. 9: Máquina Perforadora

### 6.3 Conclusiones

Como conclusión final, decir que se pueden realizar inyecciones utilizando lechadas con altos porcentajes de sustitución de cemento por escorias GGBFS, mejorando la fluidez de las mismas, facilitándose así la inyección, como también obteniéndose resistencias iguales o mejores que en las lechadas con cemento convencional o CEM IIIA, a lo largo del tiempo.

Para mejorar la resistencia en los primeros días de fraguado habría que utilizar un aditivo acelerante del mismo ampliamente utilizados en el mercado. Por lo tanto, esta investigación presenta una oportunidad para la valorización de la escoria GGBFS, en las que se llega a sustituir hasta un 90% del cemento, obteniendo una mezcla mucho más ecológica, con una mayor fluidez y durabilidad y a su vez un aumento de la capacidad resistente como muestran los resultados.



## **CAPÍTULO 7**

### **Conclusiones finales y futuras líneas de investigación**



**ÍNDICE**

7.1 Introducción .....	205
7.2 Conclusiones generales .....	206
7.2.1 Propiedades de las escorias utilizadas en esta tesis .....	207
7.2.2 Propiedades físicas de las lechadas obtenidas .....	209
7.2.3 Propiedades mecánico-resistentes de las lechadas obtenidas .....	211
7.2.4 Comportamiento medioambiental de las lechadas con sustitución de escorias .....	212
7.3 Conclusión Final .....	213
7.4 Futuras líneas de investigación .....	214



## 7.1 Introducción/ Introduction

En este capítulo se recogen las conclusiones principales de esta investigación. Muchas de ellas se han adelantado en los resúmenes introducidos en los capítulos de metodología y resultados.

Esta tesis es el resultado de dosificar una matriz cementosa con sustitución del conglomerante hidráulico por escorias de tres siderúrgicas españolas seleccionadas entre varias, con el fin de que exista un contraste en cuanto a los resultados esperados.

Cabe destacar que las lechadas cementosas fabricadas para este estudio se elaboraron a partir de mezclas especialmente fabricadas en el laboratorio de la EPSA, siendo en la primera parte de la investigación donde se utilizan las tres diferentes escorias, realizando sustituciones por tres porcentajes de escorias distintos, 30%, 40% y 50%. En la segunda parte de la investigación, sólo se utilizó la escoria más óptima (GGBFS), realizando sustituciones por tres porcentajes de escorias distintos, 50%, 70% y 90%, usando a su vez dos clases de cementos (42,5 y 52,5R) así como dos relaciones agua/cemento distintas (1/1 y 0,67/1).

De la primera parte de la investigación se ha derivado una publicación en la revista *Materials* 2019,12,1166; doi:10.3390/ma12071166. Francisca Perez-Garcia, Maria Eugenia Parron-Rubio, Jose Manuel Garcia-Manrique, Maria Dolores Rubio-Cintas. “Study of the Suitability of Different Types of Slag and Its Influence on the Quality of Green Grouts Obtained by Partial Replacement of Cement”.[1]

Las conclusiones se exponen agrupadas en función de cuatro considerandos distintos que se incluyen dentro de los objetivos planteados al inicio de la memoria para esta tesis doctoral.

Se finaliza el capítulo sugiriendo futuras líneas de trabajo que se consideran de interés.



This chapter includes the main conclusions of this research. Most of them have been advanced in the introduced summaries in the methodology and results chapters.

This thesis proposes the composition of a cementitious matrix with replacement of the hydraulic conglomerate by slag from three Spanish steelmakers selected among several of them, so that there is a contrast in terms of the expected results.

It is expected that the cementitious grouts made for this study are manufactured from mixtures specially manufactured in the laboratory of the EPSA, being the first part of the investigation where three different slags are used, making replacements for three different percentages, 30%, 40% and 50%. In the second part of the research, only the optimal slag was used (GGBFS), making substitutions by three different slags, 50%, 70% and 90% using two types of cement (42,5 and 52,5R) as well as two different water/cement relations (1/1 and 0.67/1).

The results of the first part of the investigation have been summarized within a paper recently published in Materials 2019,12,1166; doi:10.3390/ma12071166 has resulted. Francisca Perez-Garcia, Maria Eugenia Parron-Rubio, Jose Manuel Garcia-Manrique, Maria Dolores Rubio-Cintas. “Study of the Suitability of Different Types of Slag and Its Influence on the Quality of Green Grouts Obtained by Partial Replacement of Cement”.[1]

The exposed conclusions are grouped according to four different topics that are included within the objectives proposed at the beginning of the report for this doctoral thesis.

The chapter is finalized proposing future lines of work that are considered of interest.

## 7.2 Conclusiones generales/ General conclusions

De acuerdo con la fase experimental llevada a cabo en esta investigación, las conclusiones obtenidas se han dividido en cuatro apartados distintos siendo, estos los siguientes:

According to the experimental phase performed in this research, the conclusions obtained have been divided into four different sections, reported hereafter:

### **7.2.1 Propiedades de las escorias utilizadas en esta tesis/ Properties of the slags used in the thesis**

La principal característica química que diferencian a las tres escorias, es la variación del contenido en dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), por un lado, la escoria granulada procedente de alto horno GGBFS tiene un alto contenido de éste (32,5%), mientras que las escorias procedentes de vertedero disminuyen considerablemente este contenido, LFS1 (13,7%) y LFS2 (18,8%).

La capacidad de generar tobermorita (hidrosilicatos de calcio (C-S-H)), a través de la reacción con la portlandita (compuesto de hidratación mineral del hormigón) en materiales cementosos, le aporta resistencia adicional a esta mezcla de la escoria GGBFS con respecto a los dos restantes.

Por otro lado, el óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) tiene una mayor presencia tanto en LFS1 como en LFS2 (55%), mientras que en GGBFS apenas alcanza el 47%. Esto indica que los esqueletos de la matriz del material conformado por las escorias de vertedero están dotados de un mayor poder aglomerante, proporcionando mayor fluidez en su dosificación a esta tipología de lechada, como se describirá en el siguiente apartado 7.2.2.

La disposición geométrica de los granos de cemento en el agua, si la conglomeración ocurre o no, se verá desequilibrada en parte por la presencia de las escorias, creando previsiblemente un cambio en el gradiente de la relación agua/cemento, siempre en función del porcentaje sustituido y de que escoria se trate. La cristalización preferencial de hidratos correspondiente a los iones más móviles, etríngrita y portlandita, según el proceso de hidratación de Le Chatelier [2], dará paso a la

redistribución de C-S-H, siendo menor debido a la menor movilidad de los iones de silicato. La evolución de los perfiles a 28 días no es similar para los dos hidratos: la difusión de iones de calcio parece estar más influenciado por empaquetarse en la zona interfacial de transición de la lechada (ITZ) durante la hidratación a como lo hacen los iones de silicato.

Finalmente, las escorias hacen menos densas las mezclas y fluidifican el material.

The principal chemical characteristics that differentiate the three slag, is the variation in the content of silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ ). On the one hand, the granulated slag from blast furnace GGFS has a high content of it (32,5%), while the slags from the landfill decrease considerably this content, LSFI (13,7%) and LFS2 (18,8%).

The ability to generate tobermorite (calcium hydrosilicates (C-S-H)), through the reaction with portlandite (composed of mineral hydration of concrete) in cementitious materials, provides an additional resistance to this mixture of slag GGFS with respect to the remaining two.

On the other hand, the calcium oxide ( $\text{CaO}$ ) has a higher presence in LFS1 as well as LFS2 (55%), while in GGBFS barely reaches the 47%. This indicates that the skeletons of the matrix of the material made by the slags of the landfill are endowed with a greater binder power, providing greater fluidity in their dosing to this type of slurry, as it will be described in the following section 7.2.2.

The geometric arrangement of the grains of cement in the water, if the conglomeration occurs or not will be unbalanced partly by the presence of slags, creating predictably a change in the gradient of the relation water/cement, always depending on the percentage replaced and the kind of slag handling. The preferential crystallization of hydrates corresponding to the most mobile ions, ettringite and portlandite, depending on the hydration process of Le Chatelier [2], will lead to the redistribution of C-S-H, being smaller due to the lower mobility of the silicate ions. The evolution of the profiles at 28 days is not similar for the two hydrates: the

diffusion of calcium ions seems to be more influenced by being packed in the interfacial zone of transition of the grout (ITZ) during the hydration than the silicate ions.

Finally, the slags produce less dense mixtures and fluidize the material

### **7.2.2 Propiedades físicas de las lechadas obtenidas/ Physical properties of the grouts cement obtained**

Para el estudio de las propiedades físicas de la lechada es importante situarse a el nivel microestructural. Para la fluidez de la lechada de cemento con una cantidad limitada de agua, en nuestro caso la relación agua/cemento es fijada en 1/1 y 0.67/1, la zona más importante de la microestructura de la pasta de cemento en la lechada es la región próxima a la superficie o zona ITZ, estando su influencia en el comportamiento físico de la lechada de manera notoria. Los comportamientos de las mezclas con escorias tienen un mayor poder aglomerante por lo que la fluidez, en todas ellas aumenta ligeramente hasta porcentajes de sustitución del 50% y relación agua cemento 1/1, siendo las escorias LFS1 Y LFS2 las que algo más fluidifican, ya que las escorias GGBFS tienen el mismo potencial hidráulico que el cemento, justificando la similitud en cuanto a la fluidez de la lechada convencional. Sin embargo, esta capacidad de fluidez va aumentando ligeramente en altos porcentajes de sustitución de escorias (70% y 90%) con relación agua/cemento 1/1.

La densidad disminuye ligeramente en todas las mezclas con sustitución de escorias, aunque se debe recalcar que las lechadas de cemento son relativamente pesadas (alta densidad) si se requiere que la lechada en estado endurecido alcance una alta resistencia a la compresión, pero en nuestro caso aunque la densidad disminuya ligeramente con respecto a la lechada convencional, capacidad favorable a la hora de la inyección, no disminuye la resistencia a la compresión sino que por el contrario aumenta en casi todas las mezclas, como se ha visto en los capítulos de resultados.

Por otro lado, la exudación de la lechada fresca es el fenómeno que se produce por el ascenso del agua de amasado durante su tiempo de fraguado. En las lechadas con sustitución de escorias, como contiene materiales con distintas densidades, se produce una tendencia a la decantación del material más pesado, y un ascenso del agua, menos densa, por lo que las mezclas con sustitución de escorias exudan menos que la lechada convencional, siendo el porcentaje de agua exudada menor en cuanto se aumenta el porcentaje de sustitución.

For the study of the physical properties of the grout, it is important to be placed at the microstructural level. For the fluidity of the grout of cement with a limited amount of water, in our case the relation water/cement fixed to 1/1 and 0.67/1, the most relevant area of the microstructure of the cement paste in the slurry is the region closer to the surface or zone ITZ, influencing notably the physical behavior of the grout. The behaviors of the mixtures with slags have a higher binding power so that the fluidity in all of them increases slightly until percentages of 50% and relation water/cement 1/1, being the slags LSF1 and LSF2 the ones that fluidize the most, but only to a very small extent. This fact is a consequence that the slags GGBFS have the same hydraulic potential that the cement, justifying the similarity in terms of fluidity of the conventional slurry. However, this ability of fluidity faintly grows in high percentages of substitution of slags (70% and 90%) with relation water/cement 1/1.

The density slightly decreases in all the mixes with substitution of slags, although it must be highlighted that the grouts of cement are relatively heavy (high density) if grout in the hardened state is required to reach a high compressive strength. Nevertheless, in this case, even though density slightly decreases with respect to the conventional grout, favorable ability at the time of the injection, it does not decrease the resistance to the compression. On the contrary, it increases in almost all the mixtures, as it has been seen in the results of the chapters.

On the other hand, the exudation of the fresh slurry is the phenomenon produced by the rise of the mixing water during its setting time. In grouts

with substitution of slags, as they contain different material with different densities, it is produced a tendency to decant the heaviest material and a rise of water, less dense, so that the mixtures exude less than the conventional slurry, being the percentage of exudate water lower as the percentage of substitution increases.

### **7.2.3 Propiedades mecánico-resistentes de las lechadas obtenidas/ Mechanical properties of the grouts cements mixtures**

La lechada obtenida con dosificación mediante sustitución de cemento por diferentes escorias se analizó como un material continuo sin estructura interna, como por ejemplo fue propuesto por Vecchio y Collins [3,4], evitando que el comportamiento de compresión esté influenciado por la fisuración lateral. Por lo tanto, el papel para nuestra experiencia es doble. En primer lugar se necesitan ensayos para determinar las propiedades de los materiales, y en segundo lugar se necesitan inyecciones de validación del modelo propuesto.

De las escorias utilizadas, la que funciona en su sustitución de forma similar al cemento es la denominada GGBFS, obteniéndose las mismas características respecto a las resistencias a compresión y de forma general mejorándolas, con respecto a la lechada convencional, llegándose a obtener hasta el 50% de sustitución ganancias en la resistencia de hasta el 35%, a los 90 días, mientras que con las escorias LFS1 y LFS2 lo que se han obtenido son pérdidas de resistencia, para la LFS1 llegando hasta una pérdida de resistencia de aproximadamente el 42% y para la LFS2 de hasta el 84%. Por ello, se ha realizado la segunda parte de la investigación con las escorias GGBFS únicamente, llegándose a obtener ganancias en porcentajes altos de sustitución de hasta aproximadamente el 75%.

Por otro lado, en cuanto a las resistencias a flexión el comportamiento es similar, con las escorias GGBFS en porcentajes de sustitución de hasta el 50% se ha obtenido ganancias del 18%, mientras que con las escorias LFS1 y LFS2 se han obtenido pérdidas de hasta el 8% y el 67% respectivamente.

Al igual que en compresión, en porcentajes altos de sustitución por escorias GGBFS se han obtenido ganancias de hasta el 20%.

The grout cement obtained with dosing through substitution of cement by different slags was analyzed as a continuous material without internal structure, as was proposed, for example, by Vecchio and Collins [3,4], avoiding that the compression behavior is influenced by the lateral cracking. Therefore, the role for our experience is twofold. First, tests are needed to determine the properties of the materials and, secondly, validation injections of the proposed model are essential.

From the slags used, the one that works in their substitution in a similar way to cement was called GGFS, obtaining the same characteristics with respect to the resistances to compression and generally improving them, with respect to the conventional slurry, reaching up to 50% substitution gains in resistance up to 35%, at 90 days, while with the slags LFS1 and LFS2 what have been obtained are resistance losses, for the LFS1 reaching to a loss of resistance of approximately 42% and for LFS2 of up to 84%.

Conversely, regarding to flexural strengths, the behavior is similar. In GGFS slags in percentages of substitution of up to 50, gains of 18% have been achieved. Losses of up to 8% and 67% have been obtained with slag LFS1 and LFS2, respectively.

As in compression, in high percentages of substitution for slags GGFS, gains of up to 20% have been achieved.

#### **7.2.4 Comportamiento medioambiental de las lechadas con sustitución de escorias/ Enviromental behavior of the grouts with substitution of slags**

El ensayo de lixiviado ha confirmado que las escorias, al ser encapsuladas en la matriz cementante, no causa perjuicio al medio ambiente, ya que los valores de lixiviado no aumentan a la hora de la fabricación de lechada con

escoria, sino por el contrario mejoran los resultados con respecto a la lechada convencional.

Si nos referimos a la lechada en estado fresco, el único valor que está por encima del valor que exige la norma [5], es el valor del cromo (Cr), pero aun así está por debajo casi al 40% del valor de la lechada convencional. En este caso con la adición de una aditivo que reduzca significativamente la exudación de la mezcla se solventaría el problema.

The leaching test has confirmed that the slags, when encapsulated in the cementing matrix, do not cause any harm to the environment because the leachate values do not increase manufacturing the grout with slag. In fact, they improve the results with respect to the conventional grout.

Regarding to the grout in fresh state, the only value that is above the value required by the standard [5], is the value of chrome (Cr), but it is still below, almost 40% of the value of the conventional grout. In this case, with the addition of an additive that significantly reduces the exudation of the mixture, this problem would be solved

### **7.3 Conclusión Final/ Final conclusion**

Como conclusión final, ha quedado de manifiesto que las escorias de alto horno (GGBFS), son adecuadas y recomendables para la fabricación de una lechada sostenible, y en sustitución del cemento, ya que se ha comprobado como aporta mejoras considerables en las características que la lechada convencional.

Los otros dos tipos de mezclas con escorias de arco eléctrico, LFS1 y LFS2, se pueden utilizar para lechadas dónde las exigencias mecánicas sean menores, como sería para lechadas en albañilería, en definitiva para aplicaciones no estructurales, ya que de este modo se pondría en valor un residuo y se evitaría el consumo de materia prima.



La realización de lechada con escoria es un claro ejemplo de economía circular, ya que para la fabricación de estructuras es necesario el acero, y con el residuo producido por el mismo se fabrica la lechada de cemento para la realización de cimentaciones para estructuras y estabilización de suelos.

As a final conclusion, it has become clear that blast furnace slags (GGBFS) are suitable and recommended for the manufacture of a sustainable grout and in the substitution of cement, since it has been proven that they provide considerably improvements in the characteristics of conventional grout.

The remaining two types of mixtures with electric arc slag, LFS1 and LFS2, can be used for slurries where the mechanical requirements are lower, as it would be for masonry grout, in short, for non-structural applications since in this way a waste would be valued and the consumption of raw material would be avoided.

The manufacture of grout with slag is a clear example of circular economy since steel is necessary for the manufacture of structures, and with the waste produced by it, cement grout is made to build foundations for structures and stabilize floors.

#### **7.4 Futuras líneas de investigación/ Futures lines of research**

Las futura líneas de investigación son muchas y muy variadas:

- Una línea de investigación interesante sería la viabilidad que tienen estas escorias, si la transformación del residuo en producto es viable tanto económica como medioambientalmente.
- Las preguntas principales que aún no se han respondido se centran en la cuantificación de propiedades mecánicas y de transferencia en la zona de transición ITZ. Es decir, estudiar el material y de qué forma se organizan sus partículas.

A este trabajo se debe incorporar el estudio de la influencia de la fracción volumétrica de cada sustitución, su correspondencia con la relación agua-cemento.

Si estamos sustituyendo un 70% de cemento la correspondencia con la resistencia característica en cuanto a esta dosificación, se vería influenciada si se mantiene la misma relación agua-cemento. Esta puerta a la exploración más aproximativa continúa abierta y esperamos para los próximos proyectos de investigación incorporarla.

Igualmente, hacer un estudio de la microscopia electrónica para ver la distribución y comportamiento de las partículas de las mezclas; ver los enlaces y compuestos químicos que se forman a la hora de la hidratación, y ver como esta hidratación evoluciona a lo largo de los días de curado.

- Otra línea de investigación sería incorporar aditivos que minimicen el porcentaje de agua exudada en relaciones agua /cemento altas y aceleren el proceso de fraguado en los primeros días.

También fabricar lechadas con relación agua/cemento entorno a 0,4/1 para aplicarlas en micropilotes y realizarle estudios de durabilidad.

- Toda esta investigación se puede extrapolar a otro tipo de matrices cementantes, como son, conseguir un hormigón lo más ecológico posible, retirando la mayor cantidad de materia prima, tanto áridos como cemento, por escoria siderúrgica de distintas procedencias y ver hasta qué porcentajes sería posible llegar para que fuese apto para la puesta en servicio, o distintos tipos de hormigón como los Hormigones de muy alto rendimiento (HMAR).

The futures lines of research are several and varied:

- An interesting line of research would be the viability of these slags, if the transformation of the waste into a product is feasible both economically and environmentally.
- The main questions that have not been answered yet, are focused on the quantification of mechanical and transfer properties in the ITZ transition zone. In other words, study the material and how their particles are organized.

This investigation must include the study of the influence of the volume fraction of each substitution, its correspondence with the relation water/cement.

If a 70% of cement is being replaced, the correspondence with the characteristics resistance in terms of dosing would be influenced if the same relation water/cement is kept. This door to more approximate exploration remains open and we hope for the next research projects to incorporate it.

Furthermore, making a study of the electron microscopy to see the distribution and behavior of the particles of the mixtures; understand the links and chemical compounds that are created during the hydration and how this hydration evolves along the days of maturing.

- Other line of research would be to incorporate additives that minimize the percentage of water exuded in high relations water/cement and accelerate the setting process in the first days.

Moreover, making grouts with relation water/cement around 0.4/1 to apply them in micropiles and accomplish durability studies.

- All this research can be extrapolated to other type of cementing matrices, such as, to achieve a concrete as ecological as possible, removing as much raw material, both aggregates and cements, by

steel slag from different sources and analyze what percentages would be possible to achieve to be suitable for commissioning, or different types of concrete such as high performance concrete (HMAR).

## 7.5 Bibliografía

1. Perez-Garcia, F.; Parron-Rubio, M. E.; Garcia-Manrique, J. M.; Rubio-Cintas, M. D.; Perez-Garcia, F.; Parron-Rubio, M. E.; Garcia-Manrique, J. M.; Rubio-Cintas, M. D. Study of the Suitability of Different Types of Slag and Its Influence on the Quality of Green Grouts Obtained by Partial Replacement of Cement. *Materials (Basel)*. **2019**, *12*, 1166, doi:10.3390/ma12071166.
2. Vázquez Rafionich, E.; Barra, M. Reactividad y expansión de las escorias de acería de horno de arco eléctrico en relación con sus aplicaciones en la construcción. *Mater. Construcción* **2010**, *51*, 137–148, doi:10.3989/mc.2001.v51.i263-264.359.
3. Vecchio, F. J.; Collins, M. P. Compression Response of Cracked Reinforced Concrete. *J. Struct. Eng.* **1993**, *119*, 3590–3610, doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:12(3590).
4. Vecchio, F. J.; Michae. P. C. The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear. *ACI J. Proc.* 1986,83,doi:10.14359/10416.
5. European Committee for standardization EN 14405-1:2018 Geometrical product specifications (GPS) - Dimensional tolerancing - Part 1: Linear sizes.